

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Estudi del comportament fluidodinàmic dels anells del sistema de refrigeració del sincrotró ALBA sota l'acció de pertorbacions

MEMÒRIA

Autor: Alejandro Blasco Piera
Director: Francesc Xavier Escaler Puigoriol
Convocatòria: Gener de 2017



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

Aquest projecte consisteix en estudiar el comportament fluidodinàmic del sistema de refrigeració del sincrotró ALBA, concretament de l'anell Booster Ring, amb l'objectiu de desenvolupar un procediment per detectar acumulacions d'aire en els conductes.

L'estudi s'ha realitzat mitjançant simulacions numèriques unidimensionals amb el programari Flowmaster. S'ha partit d'un model ja realitzat on s'han substituït les canonades rígides per elàstiques. La primera part del treball ha consistit en una familiarització amb el programa Flowmaster, una descripció de les diferents parts que integren el sincrotró ALBA, el seu sistema de refrigeració i els elements que configuren el model.

La hipòtesi a validar en aquest treball ha estat si es produeix un canvi de la resposta freqüencial de les canonades quan s'acumula aire i si aquest canvi és detectable a partir d'una excitació forçada. Concretament, s'ha decidit utilitzar una vàlvula de tancament a l'inici de l'anell i fer variar el seu grau d'apertura amb un senyal del tipus sinusoidal. Durant l'excitació, s'han calculat les oscil·lacions de pressió en diferents punts de l'anell. S'ha observat que, efectivament, l'amplitud d'aquestes oscil·lacions varia al llarg de l'anell i varia també en funció de la freqüència amb la qual es fa oscil·lar l'apertura de la vàlvula.

Per portar a terme l'estudi, primerament s'ha identificat el senyal òptim amb el qual s'ha de fer oscil·lar la vàlvula per tal de generar pulsacions de pressió significatives i uniformes.

Un cop escollit el senyal òptim s'ha realitzat un estudi del comportament del sistema fent oscil·lar la vàlvula per un ampli rang de freqüències sense acumulació d'aire. S'ha quantificat com evoluciona l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió per cada freqüència al llarg de l'anell i per quines freqüències l'amplitud és màxima.

Finalment s'ha situat aire a diferents punts de l'anell i en diferents quantitats. S'ha comparat l'evolució de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió per diferents freqüències amb les dades obtingudes prèviament sense presència d'aire, amb l'objectiu final de trobar algun patró que permetés detectar aire acumulat en les canonades del Booster Ring.

Com a conclusió final s'ha observat que la freqüència que produeix una amplitud de les oscil·lacions de la pressió màxima sense presència d'aire es desplaça a freqüències més baixes quan s'acumula aire en el sistema de refrigeració.

Sumari

RESUM	3
SUMARI	5
1. GLOSSARI	9
1.1. Nomenclatura	9
2. PREFACI	10
2.1. Orígens del projecte	10
2.2. Motivació	10
2.3. Requeriments previs	10
3. INTRODUCCIÓ	12
3.1. Problemàtica	12
3.2. Objectius del projecte	12
3.3. Abast del projecte	13
4. EL SINCROTRÓ ALBA	14
4.1. Breu descripció de la instal·lació	15
4.1.1. Edifici principal	15
4.1.2. Edifici tècnic	18
4.1.3. Edifici taller i oficines	19
5. DESCRIPCIÓ DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓ I DEL MODEL	20
5.1. Funcionalitat dels elements del sistema	20
5.2. Descripció detallada dels models de simulació	22
5.2.1. Descripció del Booster Ring	22
5.2.2. Configuració actual del Booster	24
5.2.3. Descripció del model reduït	24
5.3. Descripció del software FLOWMASTER	25
6. FLUX A CONDUCTES	27
6.1. Pèrdua de Càrrega a conductes	27
6.2. Elasticitat de les canonades i cop d'ariet	28
7. PRESÈNCIA D'AIRE EN CONDUCTES	33
7.1. Causes	33
7.2. Problemes	33
8. CARACTERÍSTIQUES DE L'EXCITACIÓ	35

8.1. Ràtio d'apertura	35
8.2. Amplitud	37
9. RESPOSTA DEL BOOSTER SENSE AIRE	39
9.1. Nodes estudiats	39
9.2. Anell superior	40
9.2.1. Determinació de la freqüència que maximitza la resposta	42
9.2.2. Evolució de la fluctuació de la pressió entre 1,3 Hz i 4 Hz	43
9.3. Anell inferior	45
9.3.1. Determinació de la freqüència que maximitza les oscil·lacions de la pressió pel segon anell.....	46
9.3.2. Evolució de la fluctuació de la pressió entre 1,3 Hz i 4 Hz pel segon anell	47
9.4. Conclusions parcials	48
9.4.1. Freqüències escollides per realitzar les anàlisis posteriors	49
10. RESPOSTA DEL BOOSTER AMB AIRE	53
10.1. Metodologia	53
10.2. Resultats de les simulacions.....	55
10.2.1. Aire al final del primer anell	55
10.2.1.1. Presència moderada d'aire	55
10.2.1.2. Presència elevada d'aire.....	57
10.2.1.3. Efecte als nodes del segon anell	59
10.2.2. Aire mig-final del primer anell.....	63
10.2.2.1. Presència moderada d'aire	63
10.2.2.2. Presència elevada d'aire.....	65
10.2.2.3. Efecte als nodes del segon anell	67
11. COMPARATIVA SENSE AIRE I AMB AIRE	69
12. PLANIFICACIÓ	74
12.1. Diagrama circular.....	74
12.2. Diagrama de Gantt.....	75
13. IMPACTE AMBIENTAL	76
14. PRESSUPOST	77
CONCLUSIONS	79
AGRAÏMENTS	81

BIBLIOGRAFIA	82
Bibliografia complementària.....	83

1. Glossari

1.1. Nomenclatura

BL: *Beam Lines* o línies experimentals.

BO: *Booster Ring* o accelerador circular.

CELLS: Consorci per a la Construcció, Equipament i Explotació del Laboratori de Llum Sincrotró.

D02: Acumulador.

D03: Dipòsit d'expansió (Pneumatex).

EX01: Bescanviadors de calor en desús.

EX07: Bescanviadors de calor en funcionament.

P07: Grup de bombeig de l'*Experimental Area*.

P08: Grup de bombeig de l'*Storage Ring*.

P09: Grup de bombeig del *Booster Ring*.

P10: Grup de bombeig del *Service Area*.

P11: Grup de bombeig que impulsa l'aigua cap al bescanviadors EX01 i EX07.

PEC: Pressupost d'Execució per Contracte.

PEM: Pressupost d'Execució Material.

SA: *Service Area* o anell de l'àrea de serveis.

SR: *Storage Ring* o anell d'emmagatzemament.

2. Prefaci

2.1. Orígens del projecte

Avui en dia, el Consorci per a la construcció, Equipament i Explotació del Laboratori de Llum del Sincrotró (CELLS), està executant un projecte amb l'objectiu d'actualitzar i millorar el sistema de refrigeració del sincrotró ALBA amb la finalitat d'augmentar la seva fiabilitat (més protecció davant possibles fallades puntuals) i estabilitat (major robustesa davant variacions de la càrrega).

Entre aquestes activitats que busquen la millora del sistema de refrigeració del sincrotró ALBA, un dels objectius és la millora física del circuit mitjançant la instal·lació de nous reductors de pressió, filtres, purgadors d'aire o sistemes semblants per evitar sobrepressions o bosses d'aire en el sistema. És en aquest punt de millora on s'origina aquest projecte, que té per objectiu la creació d'un mecanisme que permeti detectar l'acumulació de bosses d'aire en els anells del sincrotró.

2.2. Motivació

El principal al·licient per la realització d'aquest projecte ha estat l'interès pel camp de la mecànica de fluids i de la termodinàmica. La possibilitat de poder efectuar un projecte relacionat amb aquest àmbit i que tingués una aplicació pràctica, ja que s'espera que les conclusions obtingudes amb aquest treball facilitin la presa de decisions a l'equip d'enginyeria responsable del sincrotró, ha estat un dels factors decisius per portar a terme aquest treball.

Un dels altres factors que han motivat aquest projecte ha estat la possibilitat de poder conèixer més a fons les instal·lacions i el funcionament del sincrotró ALBA. Per últim també ha estat determinant el fet de poder continuar amb un treball en el qual han estat col·laborant molts alumnes de l'ETSEIB.

2.3. Requeriments previs

Per abordar aquest projecte han estat necessaris uns coneixements bàsics de mecànica de

fluids, tant per poder entendre de forma bàsica quina és l'operativa del programa (Flowmaster), com per a poder fer una interpretació dels resultats, entendre els diferents components de la instal·lació i el seu funcionament.

Ha estat necessari l'aprenentatge del funcionament del programari Flowmaster, així com un estudi detallat de la instal·lació (es parteix d'un model prèviament elaborat).

També ha estat necessari un estudi del sincrotró ALBA, la seva funció i les característiques de les diferents instal·lacions de les quals es compon.

3. Introducció

3.1. Problemàtica

L'acumulació de bosses d'aire en el sistema de refrigeració del sincrotró ALBA genera problemes d'operació, i per tant una pèrdua continua de temps i diners per al personal del sincrotró. Actualitzar i millorar el sistema de refrigeració del sincrotró és una de les prioritats de l'equip d'enginyeria del sincrotró, i un d'aquests punts implica trobar la manera de detectar la presència d'aire en les canonades dels anells del sistema.

3.2. Objectius del projecte

L'objectiu principal del projecte és l'estudi del comportament del Booster Ring, un dels anells del sincrotró ALBA, quan es fa variar el grau d'apertura d'una vàlvula situada a l'inici de l'anell creant oscil·lacions de la pressió al llarg de l'anell. La hipòtesi de partida és que la resposta freqüencial de les canonades ha de variar quan s'acumula aire en el seu interior. Per tant, aquest estudi s'ha realitzat tant en la configuració original sense cap presència d'aire, com situant acumuladors d'aire en diferents punts de l'anell, amb l'objectiu final de detectar canvis en les oscil·lacions de pressió.

Aquest objectiu final del projecte s'ha desglossat amb objectius més concrets:

- Escollir el senyal òptim: Fer oscil·lar una vàlvula controlant la seva apertura amb senyals sinusoïdals del tipus $Y = a + b * \sin(2 \times \pi \times f \times t)$ per determinar els paràmetres del senyal que creen oscil·lacions de pressió significatives en tot l'anell.
- Fer un estudi de l'evolució d'aquestes oscil·lacions al llarg de l'anell per un ampli rang de freqüències sense presència d'aire, amb l'objectiu d'analitzar l'evolució del senyal per cada freqüència i descobrir a quines freqüències l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió és màxima. Escollir a partir de l'estudi realitzat el conjunt de freqüències que es faran servir per a l'estudi amb presència d'aire.

- Analitzar les variacions en l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió amb presència d'aire, fent variar la localització de l'aire i la quantitat d'aquest, pel conjunt de freqüències estudiat prèviament. Comparar els resultats obtinguts amb els obtinguts en l'estudi sense aire i buscar algun patró de comportament en alguna freqüència que permeti detectar l'acumulació d'aire en el sistema.

3.3. Abast del projecte

Com s'ha explicat anteriorment, aquest projecte se centra únicament en l'anell Booster Ring del sistema de refrigeració del sincrotró ALBA. S'han realitzat un conjunt de simulacions mitjançant el software Flowmaster amb l'objectiu final de poder trobar la presència d'aire en les canonades de l'anell.

4. El sincrotró ALBA

El Sincrotró ALBA és una estructura científica de tercera generació situada a Cerdanyola del Vallès (Barcelona). A la *Figura 4.1* es mostra una vista aèria d'aquest. Ha estat promogut pel Consorci per a la construcció, Equipament i explotació del Laboratori de Llum Sincrotró (CELLS) i cofinançat pels governs català i espanyol [1]. Pertany a la xarxa d'Infraestructures científiques i tècniques singulars (ICTS). Aquesta instal·lació, que és la primera d'aquestes característiques al sud-oest d'Europa, forma part del nou parc dedicat a la investigació i desenvolupament científics anomenat Parc de l'ALBA, la *Figura 4.2* mostra la ubicació i distribució d'aquest parc científic. Aquesta gran estructura científica està disponible per oferir servei a més de 1000 investigadors de la comunitat acadèmica i del sector industrial cada any.

Es tracta d'un complex d'acceleradors d'electrons per produir llum del sincrotró. Accelera electrons fins a una velocitat molt propera a la llum, on emeten radiació electromagnètica tangencialment a la seva trajectòria. Aquesta pèrdua energètica, anomenada llum del sincrotró, té longituds d'ona compreses entre els raigs infraroigs i els raigs X. Aquesta propietat de la llum permet visualitzar l'estructura atòmica i molecular dels materials i estudiar les seves propietats, fet que permet assimilar ALBA a un gran microscopi.

El sincrotró ALBA té un perímetre de 270 metres. Actualment ALBA disposa de vuit línies de llum operatives que es destinen principalment a les biociències, la matèria condensada i la ciència dels materials i es troben en construcció 2 línies de llum més.



Figura 4.1 Vista aèria del sincrotró ALBA[2].



Figura 4.2 Situació i distribució del sincrotró ALBA [2].

4.1. Breu descripció de la instal·lació

El complex, com es pot observar a la Figura 4.3, distingeix 4 edificis: principal, tècnic, taller i oficines.

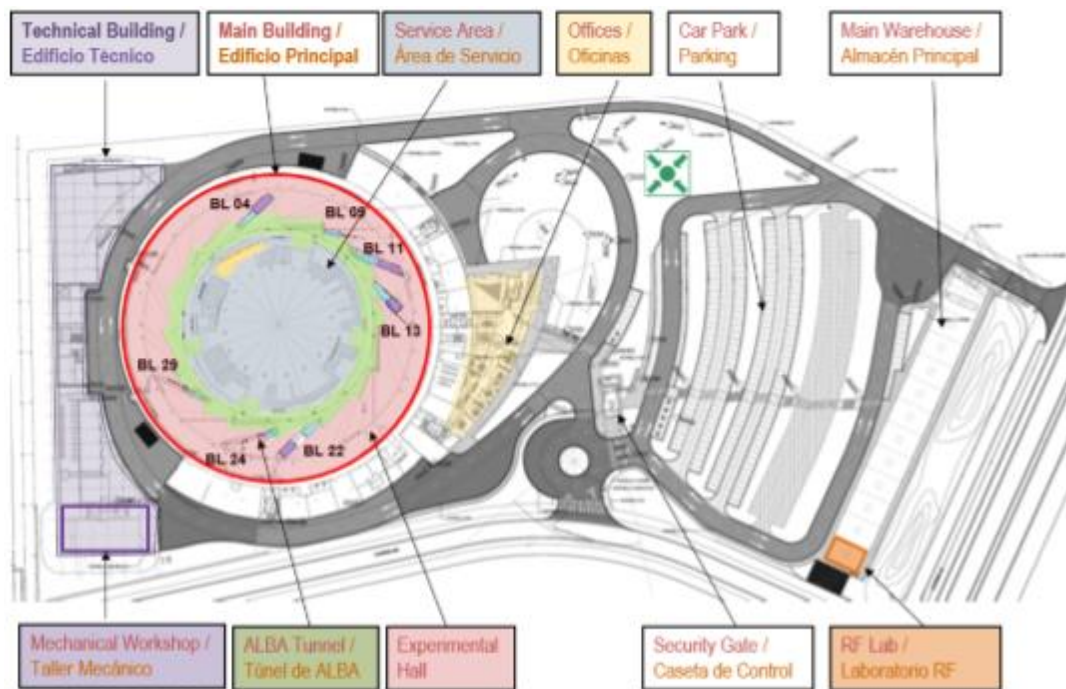


Figura 4.3 Distribució i edificis del sincrotró ALBA [3].

4.1.1. Edifici principal

Es tracta d'un recinte amb forma circular, amb un diàmetre superior als 140 m. En aquest edifici es troben continguts els elements de més rellevància de la instal·lació [4]. Aquests

components principals són un accelerador lineal, un accelerador circular i un anell d'emmagatzemament; a continuació es presenta una descripció més detallada dels mateixos.

L'accelerador lineal o Linac consisteix en un tub a l'ultra alt buit (grau de buit comprès des de 10^{-7} Pa fins a 10^{-10} Pa). Genera polsos d'electrons a 90KeV que accelera fins a 100 MeV, mitjançant camps elèctrics. Aquests electrons són dirigits cap al Booster Ring, també amb una pressió d'ultra alt buit, mitjançant una connexió denominada línia de transferència o Transfer Line [4]-[6] on el procés d'acceleració continua.

L'accelerador circular Booster Ring o anell de propulsió accelera els electrons que es generen al Linac de 100 MeV a 3GeV. Durant l'increment d'energia, els camps magnètics s'adapten a l'energia dels electrons. Quan arriba als 3 GeV s'extrau el feix d'electrons i s'envia a l'anell d'emmagatzematge i els camps magnètics tornen als seus valors inicials. Aquest cicle es repeteix 3 cops per segon. Es tracta d'un anell amb un diàmetre de 240metres i 40 imants dipolars. Els electrons són injectats cada 20 minuts a l'anell d'emmagatzematge, sense interrompre l'adquisició de dades experimentals i mantenint la intensitat del feix d'electrons constant [4]-[6].

Anell d'emmagatzemament o Storage Ring: l'anell d'emmagatzemament consta de 268,8 m de perímetre, els electrons circulen a un nivell d'energia constant i es controla la seva trajectòria, gairebé circular, mitjançant diferents tipus d'electroimants [6]. L'interior d'aquest anell es troba a l'ultra alt buit amb la fi d'eliminar la major part de molècules de gas residual i, així, evitar que els electrons es desviïn de la seva trajectòria en xocar amb elles [7]. A l'anell d'emmagatzemament també és on es dona l'emissió tangencial de llum, exactament en els punts en què el camp magnètic corba la trajectòria de l'electró.

Part de la radiació emesa, s'extreu de l'anell d'emmagatzemament a través d'unes obertures tangencials, anomenades Front Ends, i es dirigeix cap a les estacions experimentals a través d'un mur que aïlla el complex d'acceleradors de l'exterior. Aquest aïllament també és garantit per un conjunt de sistemes d'alarma i bloqueig que impedeixen la posada en marxa de l'accelerador en cas en què alguna persona estigui a l'interior o accedeixi al túnel.

Les línies de llum estan constituïdes per tubs d'acer on un cop arriba la llum sincrotró procedent de l'anell d'emmagatzemament, se selecciona la longitud d'ona desitjada per a dur a terme els experiments adients. Actualment existeixen 8 línies de llum en funcionament,

2 més amb construcció i 5 projectades i pendents de finançament. A continuació es presenten les línies de llum en funcionament actuals [5]:

BL01 MIRAS: Micro-Espectroscòpia d'Infraroig amb Transformada de Fourier, una eina molt potent per identificar les vibracions moleculars i per tant, la composició química dels materials.

BL04 MSPD: Difracció de pols d'alta resolució i difracció de pols d'alta pressió mitjançant cel·les d'enclusa de diamant.

BL09 MISTRAL: Crionanotomografia per a aplicacions biològiques. Imatges espectroscòpiques amb diferents vores d'absorció de raigs X.

BL11 NCD: Difracció no cristal·lina. Els experiments amb dispersió de raigs X d'angles petits (SAXS) proporcionen la informació estructural i la dinàmica dels grans acoblaments moleculars (polímers, proteïnes, fibres...).

BL13 XALOC: Cristal·lografia de macromolècules. Té com a objectiu proporcionar una eina flexible i fiable als grups de biologia estructural per a la resolució d'estructures de macromolècules i complexos.

BL22 CLÆSS: Espectroscòpia d'absorció i emissió. Facilita un accés simultani i unificat a dues tècniques complementàries: espectroscòpia d'absorció i espectroscòpia d'emissió.

BL24 CIRCE. Espectroscòpia i microscòpia de fotoemissió. És una línia de llum de polarització variable de raigs X tous per a experiments avançats de fotoemissió.

BL29 BOREAS. Dispersió i absorció de ressonància. La línia de llum de polarització variable de raigs X tous està destinada als investigadors d'espectroscòpia dependents de la polarització de materials avançats d'interès bàsic i aplicat.

En fase de construcció actualment es tenen dues línies: LOREA (fotoemissió amb baixa energia amb alta resolució angular per a materials complexos) i XARIA línia de micro focus per cristal·lografia molecular.

A la *Figura 4.4* es pot observar un esquema amb els diferents acceleradors i línies de llum.

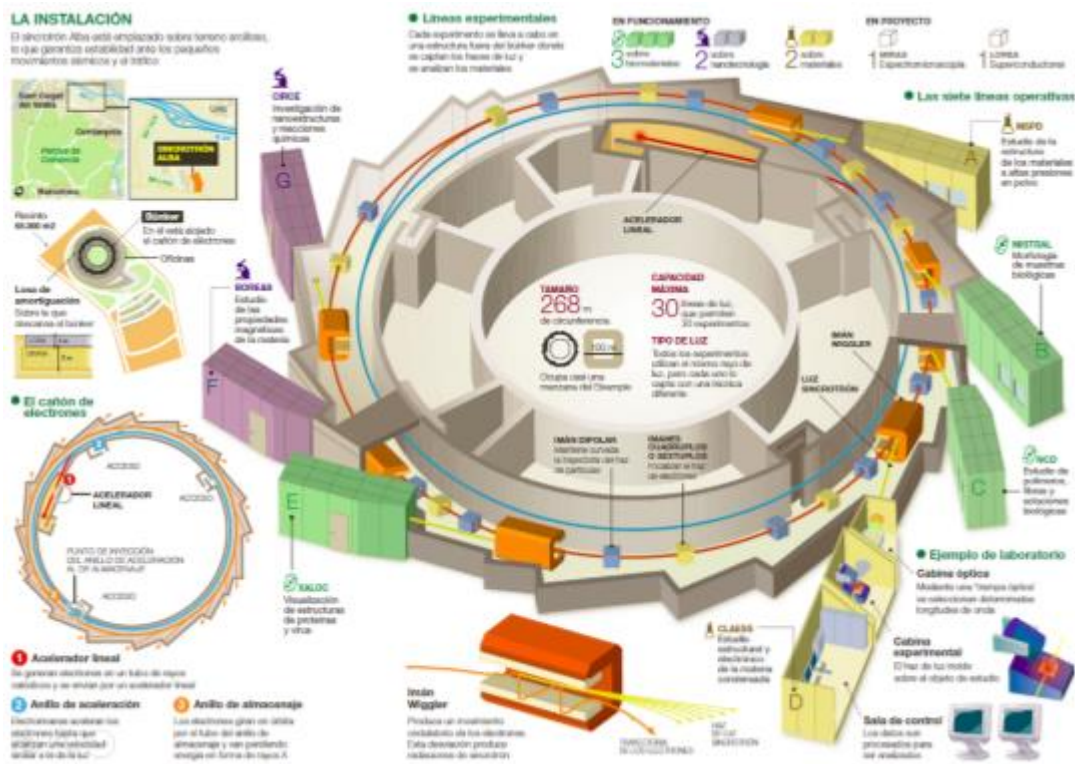


Figura 4.4 Esquema del túnel i experimental Hall del síncrotró ALBA [8].

4.1.2. Edifici tècnic

L'edifici tècnic, separat de l'edifici principal per a evitar la transmissió de vibracions i permetre la necessària ventilació i accessibilitat, està situat baix rasant amb la fi d'aprofitar el pendent natural del terreny.

Els diversos gasos (gas natural i aire comprimit) i fluids (dièsel i fluids tècnics), emmagatzemats o rebuts des de la xarxa, es distribueixen a la resta de la instal·lació a través d'una galeria subterrània; com es pot comprovar a la Figura 4.5.

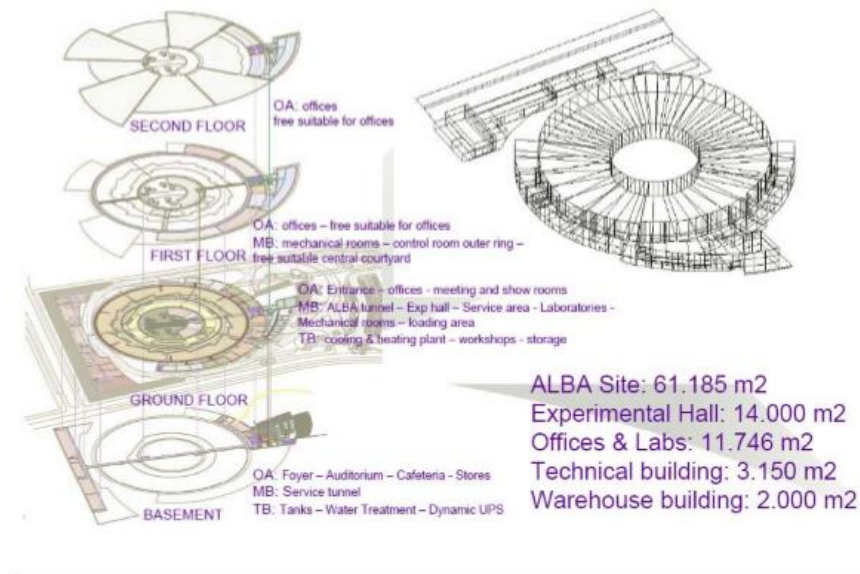


Figura 4.5 Edificis de la font de la llum del sincrotró ALBA [2].

La producció d'energia tèrmica i frigorífica es duu a terme en plantes situades en aquest edifici, el qual també té instal·lades les bombes que garanteixen la distribució de l'aigua freda i calenta. Atenent els diversos punts finals d'utilització es distingeixen diversos circuits de distribució de l'aigua:

Aigua de refrigeració, a $7 \pm 0,5$ °C, principalment per a climatització a l'estiu [2].

Aigua calenta, a 50 ± 1 °C, fonamentalment per a climatització a l'hivern [2].

Aigua desionitzada, a $23 \pm 0,2$ °C, per a refrigerar els imants del túnel així com l'equipament científic. Aquests equips requereixen que el refrigerant compleixi un seguit de paràmetres tècnics. Per a garantir dites propietats, l'aigua es tracta mitjançant unitats de descalcificació i d'osmosi inversa [2].

4.1.3. Edifici taller i oficines

La importància d'aquests edificis per l'abast d'aquest projecte és redundant; simplement nombrar la seva existència.

5. Descripció del sistema de refrigeració i del model

5.1. Funcionalitat dels elements del sistema

Els quatre anells principals són refrigerats mitjançant un circuit d'aigua desionitzada; essent cadascun dels anells alimentats per un grup d'impulsió. A continuació es presenta la correlació entre anells i grups de bombeig:

- Booster Ring(BO): grup P09.
- Storage Ring(SR): grup P08.
- Service Area (SA): grup P10.
- Experimental Area (EA): grup P07.

Els grups d'impulsió P08 i P10 disposen de tres bombes en paral·lel, mentre que els grups d'impulsió P09 i P07 disposen de dues bombes en paral·lel. Un variador de freqüència regula la velocitat de gir de cada bomba a fi d'obtenir una pressió d'impulsió fixa a l'entrada dels anells amb la finalitat que no s'obtingui la pressió màxima de disseny dels components i instrumentació que els integren.

L'aigua calenta resultant del seu pas pels components electromagnètics dels anells s'agrupa en una única línia anomenada retorn comú com es mostra en la *Figura 5.1* i *Figura 5.2*. Una part d'aquest cabal pot ser aspirat pels grups impulsors amb la fi de regular la temperatura de l'aigua d'alimentació dels anells. El cabal restant és dirigit per un altre grup de bombeig (P11), regulat també per un variador de freqüència, cap a un parell de bescanviadors (EX07) que refrigeren dita aigua. L'aigua ja refredada és guiada cap a un acumulador (D02), el qual disposa de dues connexions:

- Connexió superior: enllaça l'acumulador amb el retorn comú i està ubicada a l'aspiració del grup P11. La seva funció és compensar l'excés o manca de cabal procedent de la línia de retorn comú i, per tant, és bidireccional.
- Connexió inferior: succiona una part de l'aigua freda continguda a l'acumulador per a conduir-la cap als grups de bombeig dels anells i, per tant, és unidireccional.

En un punt del conducte que transporta l'aigua refrigerada pels bescanviadors EX07 cap a l'acumulador D02, hi ha connectat un sistema de manteniment de la pressió. Aquest últim, denominat dipòsit d'expansió D03 o Pneumatex, té com a objecte garantir una pressió del retorn de $2 \cdot 10^5$ Pa.

Les dues figures següents també mostren com, a l'aspiració dels grups d'impulsió, la temperatura de l'aigua es regula mitjançant unes vàlvules mescladores que combinen l'aigua procedent de l'acumulador D02 amb la del retorn comú.

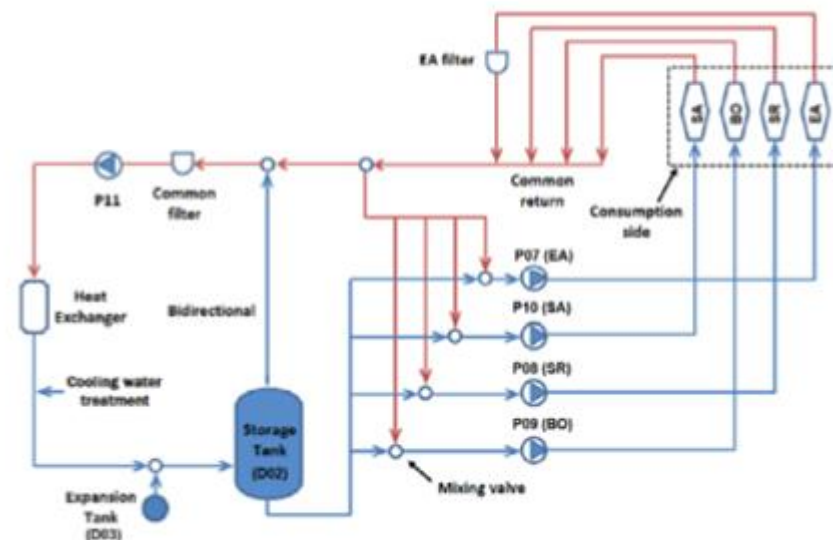


Figura 5.1 Esquema simplificat del sistema de refrigeració [9].

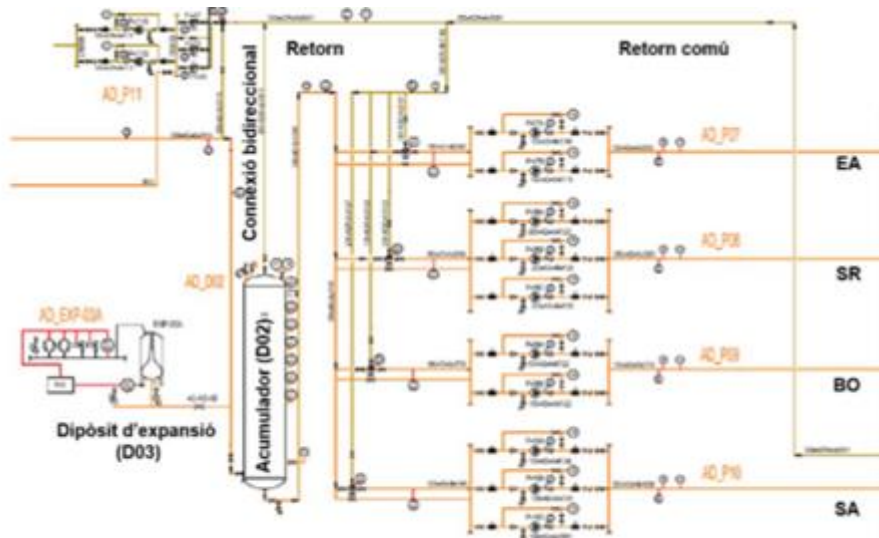


Figura 5.2 Esquema detallat del sistema de refrigeració [9].

5.2. Descripció detallada dels models de simulació

Dintre del sistema de refrigeració, aquest treball s'ha centrat en l'anell Booster Ring. A continuació es detalla l'estructura d'aquest anell.

5.2.1. Descripció del Booster Ring

El Booster Ring és un anell molt extens, consta de més de 2000 elements entre canonades, vàlvules, colzes, intercanviadors de calor... per citar tan sols uns pocs.

Per entendre de forma esquemàtica com funciona la refrigeració del Booster Ring, hom es pot imaginar dos anells formats per dues canonades principals, una situada per sobre de l'altra i connectades entre ells per múltiples subsistemes de canonades que van de l'anell superior a l'anell inferior.

L'anell superior està connectat a una font de cabal i de pressió, el punt connectat a aquestes dues fonts és l'entrada d'un connector en T. A les seves dues sortides, a dreta i a esquerra, hi ha dues vàlvules de tancament que permeten controlar la direcció del flux a través de l'anell. Concretament, una de les vàlvules es mantindrà oberta i l'altra tancada, permetent d'aquesta manera el flux de cabal solament en una direcció de l'anell i recorrent 360 graus. A mesura que s'avança al llarg d'aquest anell superior, el cabal es va desviant cap a l'anell inferior a través de subsistemes que els connecten, disminuït així la presència de cabal a

mesura que s'avança en l'anell superior i augmentant el cabal a mesura que s'avança en l'anell inferior.

La sortida de l'anell inferior també està connectada a una font de pressió (a una pressió molt més baixa que en el cas de l'anell superior). De forma idèntica a l'anell superior, hi ha un connector en T al final del mateix amb dues vàlvules, una oberta i l'altra tancada però de forma inversa a les de l'anell superior. La *Figura 5.3* mostra de forma esquemàtica el funcionament del sistema de refrigeració del Booster Ring.

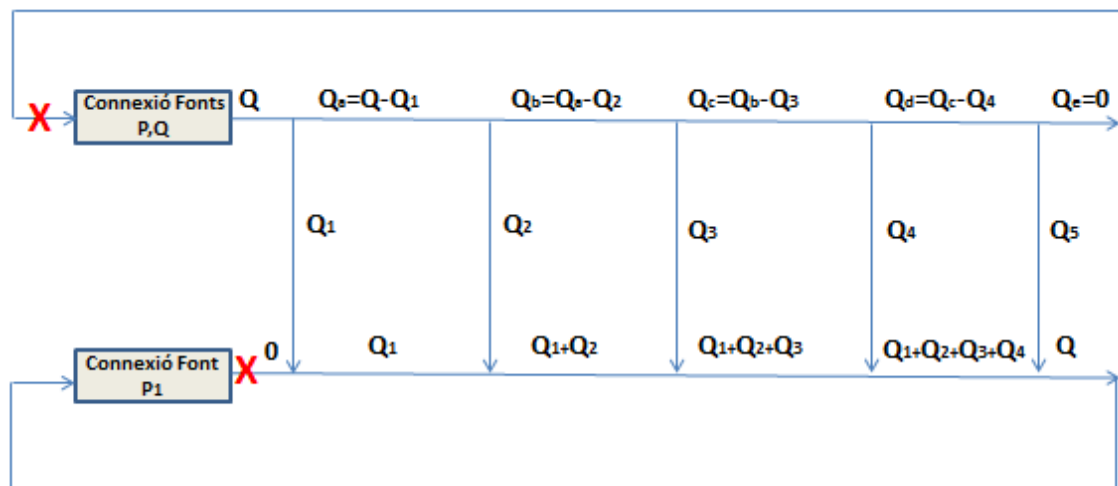


Figura 5.3 Esquema simplificat del funcionament del Booster Ring.

La *Figura 5.4* mostra com estan modelades les connexions entre anell superior i inferior. Notar que aquestes connexions que es mostren a la *Figura 5.4* es van repetint de forma periòdica al llarg de l'anell. Les canonades superiors pertanyen a l'anell superior, i s'aprecia clarament com periòdicament van descendant canonades cap a l'anell inferior.

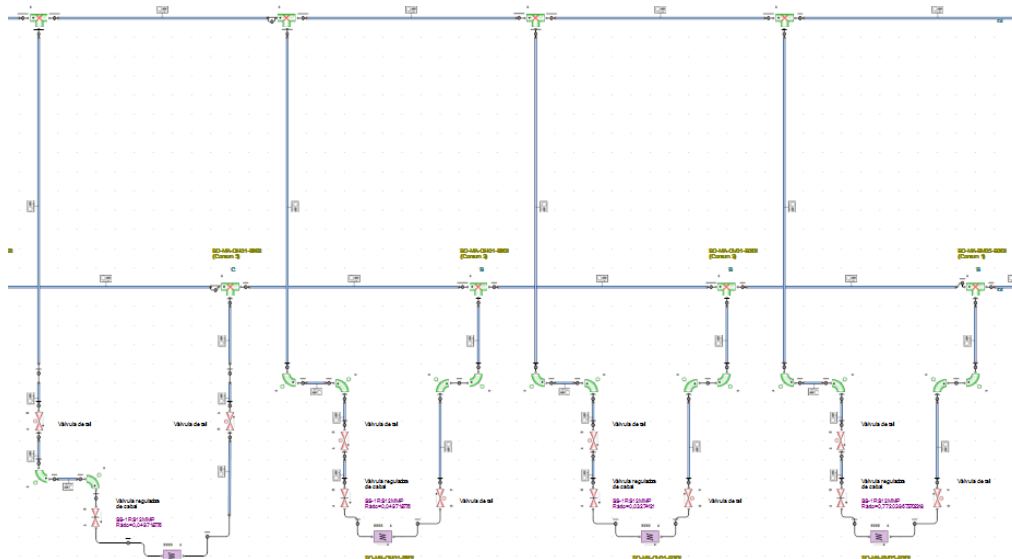


Figura 5.4 Representació del model de simulació del Booster Ring en el model numèric.

Per a poder estimar la mida del Booster Ring, la *Figura 5.5* mostra una imatge de tot el sistema de simulació, on clarament no es pot apreciar cap dels components a causa de l'escala de la imatge. L'objectiu de la *Figura 5.5* és el de poder fer una comparativa amb la *Figura 5.4*, entre les quals hi ha una diferència d'escala 1:30 per a poder fer una estimació de l'envergadura total del sistema.



Figura 5.5 Representació de tot el sistema de simulació del Booster Ring.

5.2.2. Configuració actual del Booster

Per al conjunt de simulacions que s'efectuaran al llarg del projecte, el funcionament de l'anell és el que s'ha explicat en el punt 5.2.1, amb la peculiaritat que la vàlvula de l'anell superior, que en un principi estava oberta completament, es farà oscil·lar en el temps mitjançant un senyal sinusoïdal. Seran aquestes oscil·lacions de la vàlvula, com ja s'ha explicat en els primers punts del projecte, les que provocaran oscil·lacions en la pressió al llarg del sistema que serà el que s'estudiarà per comprovar com afecta l'acumulació d'aire en aquestes oscil·lacions de la pressió.

5.2.3. Descripció del model reduït

Per a realitzar les primeres simulacions del sistema s'ha fet servir un model reduït del

Booster Ring. Aquest model reduït està connectat amb les mateixes fonts de pressió i cabal que ho està el Booster, però consta solament d'un petit nombre de canonades. S'ha fet servir per a realitzar proves en un inici del projecte, a causa del poc temps emprat pel software per realitzar les simulacions en aquest sistema i per a poder fer un primer aprenentatge del funcionament del software i del sistema de refrigeració. La *Figura 5.6* mostra aquest model reduït on també es pot apreciar el controlador connectat a la vàlvula que regula el grau d'apertura d'aquesta provocant les oscil·lacions.

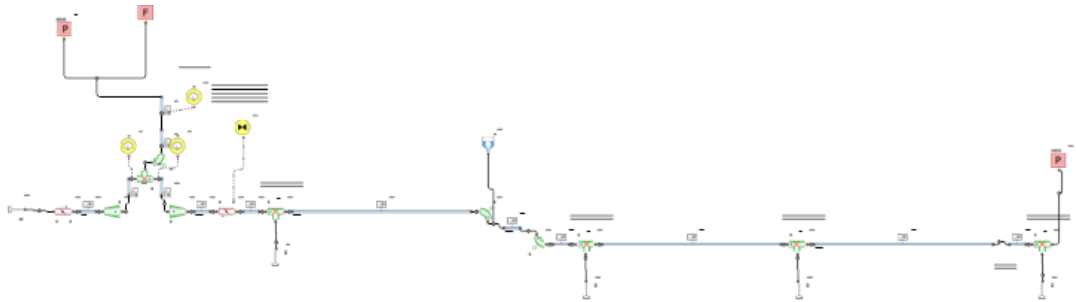


Figura 5.6 Model reduït del Booster Ring.

5.3. Descripció del software FLOWMASTER

Flowmaster ha estat l'eina escollida per desenvolupar aquest projecte i que ha permès realitzar les simulacions que es presentaran en els punts posteriors. El programa Flowmaster V7 és una eina avançada que permet modelar tot tipus de problemes hidràulics i reduir de forma significativa el temps i potència requerida en comparació en programes similars al mercat.

Com s'ha comentat, s'ha partit d'un model prèviament dissenyat per un anterior projecte de final de carrera [10] i ja validat, amb el qual s'ha treballat. Les propietats dels components s'han adquirit a partir de dades reals proporcionades per l'empresa com plànols o característiques tècniques. S'han efectuat uns petits canvis en el model: la incorporació de canonades elàstiques i la regulació de l'apertura de la vàlvula que controla el cabal a través de l'anell superior.

La *Figura 5.7* il·lustra els diferents subsistemes pels quals està format el model complet del sistema de refrigeració del sincrotró ALBA, notar que en aquest projecte solament se centrarà amb el Booster Ring.

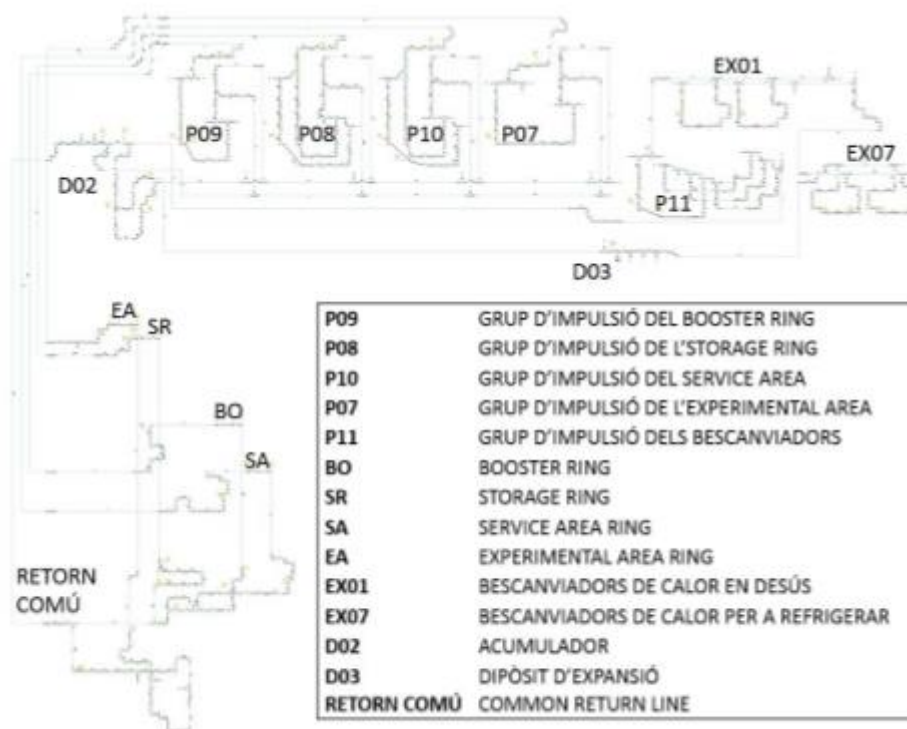


Figura 5.7 Esquema del model sencer i descripció dels seus subsistemes.

6. Flux a conductes

6.1. Pèrdua de Càrrega a conductes

S'anomena pèrdua de càrrega en una canonada a la pèrdua de la pressió produïda en un fluid a causa de la fricció de les partícules de fluid entre si i contra les parets de la canonada que les condueix [11]. Les pèrdues lineals representen la despesa d'energia que suposa vèncer la fricció en un conducte, mentre que les singulars reproduïxen l'energia necessària per a superar la resistència d'un element singular com un colze, filtre, etc.

Les pèrdues de càrrega lineals s'han modelitzat mitjançant l'equació de Darcy-Weisbach, la forma principal de l'equació és la que es mostra en l'equació 6.1.

$$h_f = f \times \frac{L}{D} \times \frac{V^2}{2g} \quad (\text{Eq. 6.1})$$

On:

h_f = pèrdua de càrrega deguda a la fricció [m].

f = Factor de Darcy [-].

L = Longitud de la canonada [m].

D =Diàmetre de la canonada [m].

V =Velocitat mitja del Fluid [m/s].

g = Acceleració de la gravetat [m/s^2].

Les pèrdues de càrrega singulars s'obtenen a partir de l'equació 6.2:

$$h_v = K \frac{V^2}{2g} \quad (\text{Eq. 6.2})$$

On:

h_v =Pèrdua de càrrega localitzada [m].

V = Velocitat mitjana de l'aigua [m/s].

K = Coeficient determinat de forma empírica per a cada tipus de punt singular [-].

La *Figura 6.1* mostra la diferència entre la pressió entre 5 nodes situats en l'anell superior del Booster Ring quan el flux és estacionari i es té la vàlvula sense oscil·lar. Com es pot apreciar la diferència de la pressió entre el primer node i el darrer és de l'ordre de 30 kPa i indica quines són les pèrdues de càrrega.

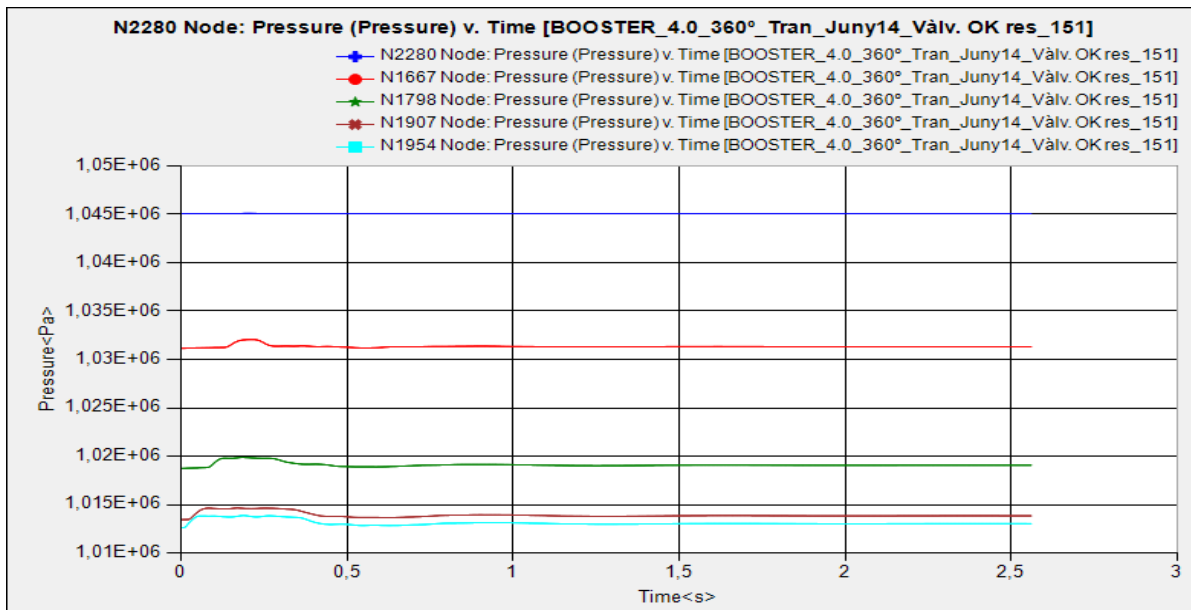


Figura 6.1 Pèrdua de càrrega al Booster Ring.

6.2. Elasticitat de les canonades i cop d'ariet

En aquest projecte s'ha realitzat un canvi respecte el model de partida que ha estat la substitució de les canonades rígides per canonades elàstiques, en realitzar aquest canvi és necessari introduir un nou paràmetre, la velocitat de propagació de l'ona, el qual es calcula mitjançant l'expressió de l'equació 6.3 [12].

$$c = \sqrt{\frac{\frac{B}{\rho}}{1 + \frac{D}{e} \times \frac{B}{E}}} \quad (\text{Eq. 6.3})$$

On c és velocitat de propagació de l'ona [m/s], B és el mòdul d'elasticitat del fluid [Pa], ρ densitat del fluid [kg/m³], D és el diàmetre de la canonada [m], e el gruix de la canonada [m] i E el mòdul d'elasticitat del material de la canonada [Pa].

Un dels fenòmens més importants que es pot produir i s'ha de tenir en compte en realitzar l'estudi és el cop d'ariet. El cop d'ariet és un fenomen que es produeix en les conduccions on circula un líquid, quan es fa variar de forma brusca l'estat d'algun component regulador, en el nostre cas d'estudi una vàlvula. Per exemple si es fa el tancament d'una vàlvula es produirà sobrepressió i en el cas de produir-se una obertura es provocarà una depressió.

En l'àmbit físic aquestes variacions de pressió estan estrictament relacionades amb la compressibilitat del fluid i amb la capacitat de dilatació de les parets que dels conductes. La sobrepressió originada crea un estat de desequilibri que origina la seva propagació al llarg de la canonada, produint així una fluctuació que es va estenent al llarg de la canonada. El cop d'ariet és per tant un fenomen de caràcter ondulatori.

La intensitat del cop d'ariet dependrà del temps de tancament de la vàlvula, de la longitud de la canonada i de la velocitat de propagació de l'ona en aquesta [12]:

- Tancament instantani: Es produeix la màxima fluctuació de la pressió, la *Figura 6.2* il·lustra la seva evolució.
- Tancament ràpid: $t < 2L/c$; essent t el temps de tancament [s], L la longitud de la canonada [m] i c la velocitat de propagació de l'ona [m/s]. El cas d'estudi és el mateix que en un tancament instantani i queda il·lustrat en la *Figura 6.2*.
- Tancament lent: $t > 2L/c$. La fluctuació és baixa i s'atenua ràpidament.

La *Figura 6.2* mostra a continuació el fenomen de cop d'ariet per un període $t = 4L/c$.

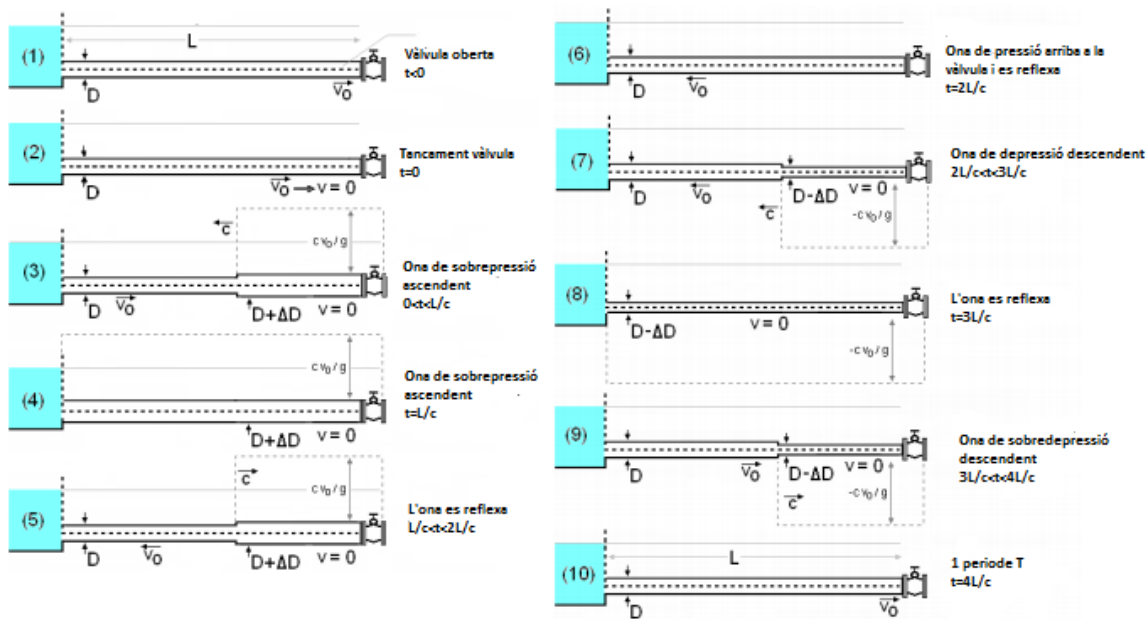


Figura 6.2 Descripció de les etapes del cop d'ariet.

Un cop introduït el concepte de cop d'ariet, a continuació es mostra els seus efectes en el model del Booster reduït, mostrat anteriorment en la *Figura 5.6*. Notar que el cop d'ariet es dona per tancaments d'una vàlvula en un temps $t < 2L/c$. Tenint en compte que les canonades més llargues de l'anell són de l'ordre de 3 metres i que la velocitat de propagació de l'ona és de l'ordre de 1200m/s caldria tancar la vàlvula en un temps inferior a 0,005 segons per a què es produís aquest fenomen en el Booster Ring. Per a il·lustrar els efectes del cop d'ariet en les fluctuacions de la pressió es mostra l'efecte d'un tancament sobtat de la vàlvula en el model reduït en la *Figura 6.3*. De fet, Aquest fenomen no s'hauria de donar perquè no es treballarà amb tancaments sobtats de vàlvules i les freqüències a les quals la vàlvula oscil·larà seran relativament baixes.

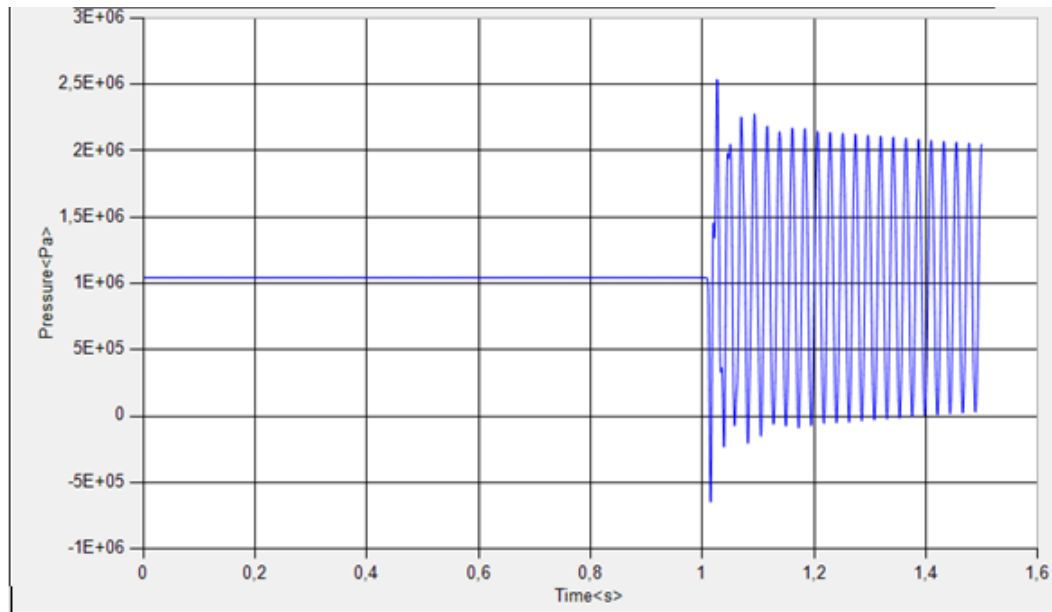


Figura 6.3 Oscil·lacions de la pressió degudes al cop d'ariet.

En el cas de la *Figura 6.3* a part del cop d'ariet hi ha associat un altre fenomen molt perjudicial per al sistema anomenat cavitació. En aquest cas al produir-se aquesta oscil·lació de la pressió tan accentuada en el valor de la pressió deguda al cop d'ariet, la pressió pot arribar en alguns punts a estar per sota de la pressió de vapor del líquid. Quan s'assoleix aquesta pressió de vapor es formen bombolles o més concretament cavitats d'aire, per després tornar novament al seu estat líquid com mostra la *Figura 6.4*. Les bombolles formades viatgen a zones d'una pressió més elevada i el vapor torna a estat líquid d'una manera més ràpida produint col·lapses que poden causar un arrencament del material de la superfície on s'origina aquest fenomen [11].

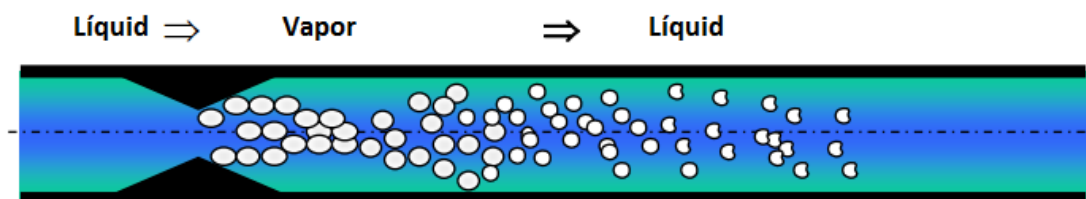


Figura 6.4 Fenomen de cavitació en una canonada.

Si s'augmenta lleugerament el temps de tancament de la vàlvula, es comprova que l'amplitud de les oscil·lacions disminueix notablement, com es mostra en la *Figura 6.5*. També es fa patent l'atenuació de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió al llarg del temps.

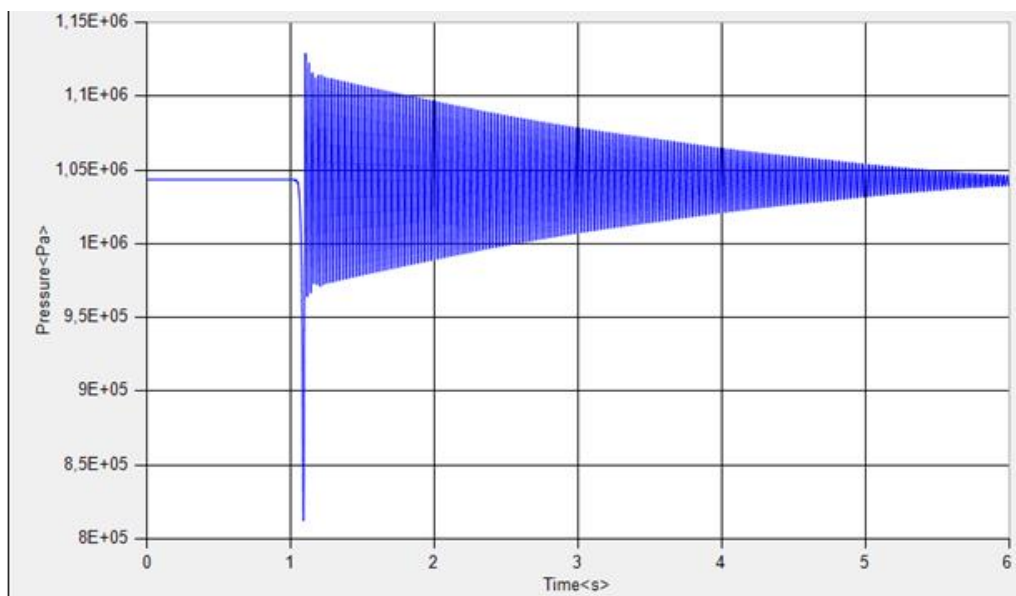


Figura 6.5 Atenuació de l'efecte del cop d'ariet al llarg del temps.

7. Presència d'aire en conductes

7.1. Causes

L'aire es concentra en canonades principalment a causa de tres factors:

1. Per alliberació de l'aire dissolt a l'aigua. Un fluid conté aire dissolt en quantitats variables en funció de la pressió i de la temperatura. Així, a la temperatura de 20 °C i pressió atmosfèrica, el contingut d'aire dissolt a l'aigua és de 20 litres per cada m^3 d'aigua. L'ascens de la temperatura i el descens de la pressió reduirà el contingut d'aire dissolt en aigua. Per exemple, una canonada que transporta un cabal d'aigua de $100 \frac{m^3}{h}$ a una pressió constant, el canvi de temperatura de 15 °C a 20 °C produirà 500 litres d'aire per hora que es quedaran atrapats a la canonada.
2. Per entrada d'aire des de l'exterior de les canonades.
3. Per evacuació incompleta d'aire durant l'emplenat de les canonades.

7.2. Problemes

A continuació es presenten un llistat dels problemes més comuns originats per la presència d'aire en canonades [13]:

- Reducció de la secció efectiva de la canonada. L'aire es concentra en canonades i accessoris en forma de bosses. Aquestes bosses, concentrades generalment en aquells punts alts de la conducció on el cabal és menys intens, redueixen la secció de pas produint: una reducció de la capacitat de transport de la canonada, un increment de les pèrdues de càrrega i la possibilitat que es produeixi cavitació.
- Si el sistema està alimentat per bombeig, serà necessària una major pressió i a vegades el bombeig no serà suficient per subministrar pressió requerida per vèncer les bosses d'aire, per la qual cosa el flux del sistema es detindrà totalment.

- En aquelles conduccions no impulsades (en les que no hi ha presència d'un grup de bombeig) la influència de les bosses d'aire serà més accentuada perquè no hi haurà cap manera d'actuar sobre el sistema per superar-les.
- Ruptura de les canonades per sobrepressió. L'existència d'aire pot produir augmentos dràstics de la pressió que produeixin la ruptura de canonades.
- Cavitació. En reduir la secció efectiva de la canonada, la velocitat a la qual passa l'aigua augmenta, el que provoca una caiguda de la pressió local, si aquesta pressió cau per sota de la pressió de vapor, com s'ha vist al punt 6.2, es formen bombolles de vapor.
- Reduir l'eficiència de les bombes i les turbines. Quan aigua mesclada amb aire entra en una turbina, ocasiona una pèrdua de potència originant una reducció del seu rendiment.
- Pot donar lloc a errors en les lectures dels equips de mesura.
- Canvis en les propietats generals del fluid (en produir-se una mescla entre aire i aigua). Afectarà majoritàriament a la densitat i a l'elasticitat.
- En canonades ferroses, la presència d'aire afavoreix la corrosió perquè proporciona més oxigen al procés.

8. Característiques de l'excitació

Com s'ha explicat en apartats anteriors, l'objectiu fonamental del projecte és provocar oscil·lacions de pressió al Booster Ring mitjançant la variació sinusoidal del grau d'apertura d'una vàlvula situada a l'inici de l'anell.

La vàlvula que s'ha fet oscil·lar és una vàlvula del tipus papallona, al ser la que presenta un coeficient de pèrdues més lineal en funció del grau d'apertura [13].

Primer de tot és fonamental decidir el valor dels diferents paràmetres del senyal que controlarà el grau d'apertura de la vàlvula i que provocarà les oscil·lacions. Es tracta d'un senyal sinusoidal amb els paràmetres de l'equació 8.1.

$$Y = a + b * \sin(2 \times \pi \times f \times t) \quad (\text{Eq 8.1})$$

On:

- a=Ràtio d'apertura [-].
- b=Amplitud [-].
- f=Freqüència [Hz].
- t=Temps [s].

En aquest primer apartat es busca determinar la ràtio d'apertura i l'amplitud òptimes. La freqüència no s'ha determinat en aquest punt, ja que és el paràmetre que es farà variar al llarg de les simulacions per comprovar el comportament del sistema.

8.1. Ràtio d'apertura

Per l'elecció de la ràtio d'apertura, s'ha de tenir en compte com opera la vàlvula papallona en el model a l'hora d'obrir-se i tancar-se. Per la ràtio d'apertura 0, la vàlvula es troba totalment tancada i amb la ràtio d'apertura 1 es troba totalment oberta amb la part giratòria circular completament paral·lela al flux després de girar-la 90 graus. La *Figura 8.1* mostra de forma esquemàtica els estats d'apertura i tancament de la vàlvula papallona.

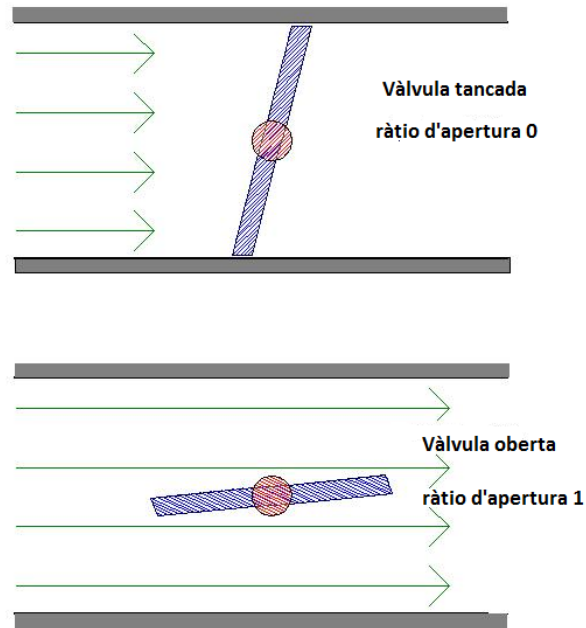


Figura 8.1 Representació esquemàtica dels estats d'apertura i tancament per la vàlvula papallona [13].

A l'hora d'oscil·lar, la vàlvula papallona primerament s'inclina segons la ràtio d'apertura establerta i un cop inclinada comença a oscil·lar sobre ella mateixa. Per ràtios d'apertura baixos, vàlvula pràcticament tancada, es produeixen vòrtexs a la sortida de la vàlvula que originen altes turbulències. Tenint en compte aquesta restricció, serà necessari la ràtio d'apertura més gran possible que no generi grans vòrtexs però si generi fluctuacions de pressió.

El que es comprova és que per ràtios d'apertura molt grans l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió no és significativa. Per ràtios d'obertura de 0,95 a 0,8 s'obtenen amplituds de la pressió poc significatives.

A mesura que es disminueix la ràtio d'obertura, la fluctuació de la pressió va augmentant de forma gradual, però no és fins ràtios d'apertura de l'ordre de 0,7 que s'obtenen unes oscil·lacions significatives a gairebé tots els punts de l'anell.

Les diferents freqüències afecten l'amplitud de les oscil·lacions; mantenint-se estable aquesta amplitud per a freqüències baixes i presentant diferents màxims i mínims al llarg de l'anell per freqüències altes. Al punt 9 es tractarà aquest tema amb més deteniment. Per l'elecció de la ràtio d'obertura s'ha realitzat l'estudi mirant que per un ampli rang de freqüències i a nodes en diferents posicions al llarg del *Booster Ring* l'amplitud de les

oscil·lacions de la pressió arribés a un mínim de 1000 Pa per ser considerat significatiu.

Finalment s'ha arribat a la conclusió que el valor de la ràtio d'obertura major que garanteix unes oscil·lacions significatives al llarg de tot l'anell és el de 0,7.

8.2. Amplitud

L'amplitud del senyal actua d'una forma inversa a la ràtio d'obertura, com és obvi, si s'augmenta l'amplitud del senyal, augmenta l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió, i si disminueix l'amplitud del senyal disminueix l'amplitud de la pressió. Té associat però un inconvenient: a mesura que s'augmenta l'amplitud del senyal es perd el caràcter sinusoidal de l'ona, donant lloc a oscil·lacions si bé més grans i més significatives, també més irregulars i que poc tenen a veure amb el senyal sinusoidal buscat. Per aquest motiu és necessari buscar l'equilibri entre, per una banda, una amplitud que proporcioni una amplitud de la pressió significativa, i per altra banda, que no distorsioni en excés el senyal. S'ha considerat que aquesta amplitud idònia del senyal es troba al voltant de 0,05.

La *Figura 8.2* compara l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió pel node 1898 (un node de la posició mitjana-final de l'anell superior) utilitzant com a senyals per controlar el grau d'apertura de la vàlvula l'equació 8.2 i l'equació 8.3. En la *Figura 8.2* es fa patent que la fluctuació de la pressió perd notablement el seu caràcter sinusoidal per al senyal d'amplitud 0,1.

- $Y = 0,7 + 0,05 \times \sin(2 \times \pi \times 0,5 \times t)$ (Eq. 8.2)

- $Y = 0,7 + 0,1 \times \sin(2 \times \pi \times 0,5 \times t)$ (Eq. 8.3)

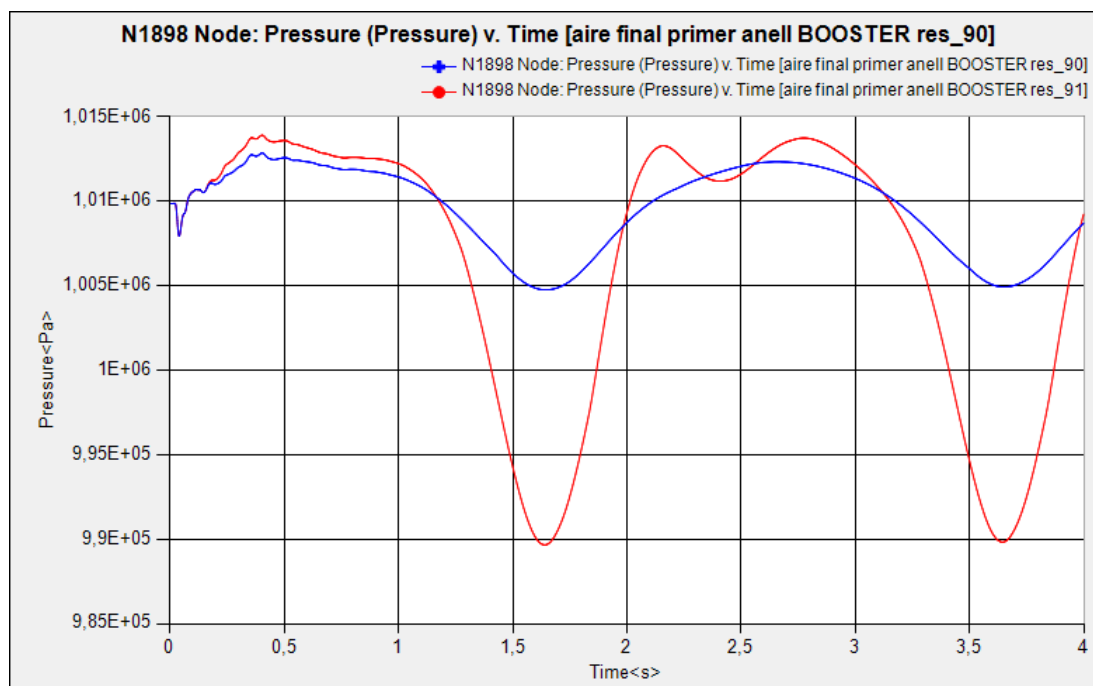


Figura 8.2 Representació gràfica de la fluctuació de la pressió al node 1898 per senyals d'amplada 0,05 i amplitud 0,1.

S'obté doncs el següent senyal, on la freqüència f s'anirà variant al llarg de l'estudi. En la Figura 8.3 es mostra un exemple del senyal escollit, representat en l'equació 8.4, per una freqüència de 0,5 Hz.

$$Y = 0,7 + 0,05 * \sin(2 \times \pi \times f \times t) \quad (\text{Eq. 8.4})$$

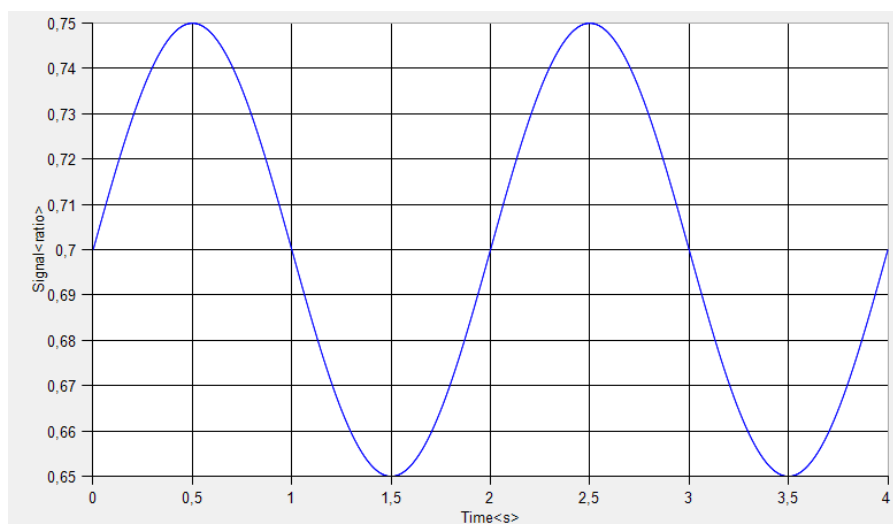


Figura 8.3 Representació gràfica del senyal escollit per fer oscil·lar la vàlvula amb freqüència 0,5Hz.

9. Resposta del Booster sense aire

En primer lloc s'ha realitzat un estudi de com es comporten les oscil·lacions de la pressió a diferents nodes del Booster originades en fer oscil·lar la vàlvula segons el senyal $Y = 0,7 + 0,05 * \sin(2 \times \pi \times f \times t)$.

Aquest estudi s'ha realitzat per un ampli rang de freqüències i s'ha estudiat l'evolució d'aquestes oscil·lacions per a un conjunt de nodes a diferents punts de l'anell i a una posició equidistant entre ells.

9.1. Nodes estudiats

Els nodes estudiats es troben en una posició relativament equidistant al llarg dels dos anells del Booster. S'han escollit divuit nodes, nou situats a l'anell superior i nou situats a l'anell inferior.

- Els nodes de l'anell superior són: node 2280, node 2387, node 1667, node 1708, node 1748, node 1798, node 1854, node 1907 i node 1954.
- Els nodes escollits per l'anell inferior són: node 2382, node 2301, node 1382, node 1173, node 895, node 781, node 583, node 402, node 157.

La *Figura 9.1* il·lustra de forma esquemàtica la situació dels nodes al llarg del Booster. El node 2280 estaria al principi de l'anell superior, just després de la vàlvula, i la resta dels 8 nodes de l'anell superior estan situats de manera equidistant al llarg de l'anell tal com s'il·lustra en la *Figura 9.1*. De la mateixa manera, el node 2382 està a l'inici de l'anell inferior, just després de la vàlvula que roman tancada, i la resta dels 8 nodes del segon anell estan situats de manera equidistant al llarg de l'anell inferior.

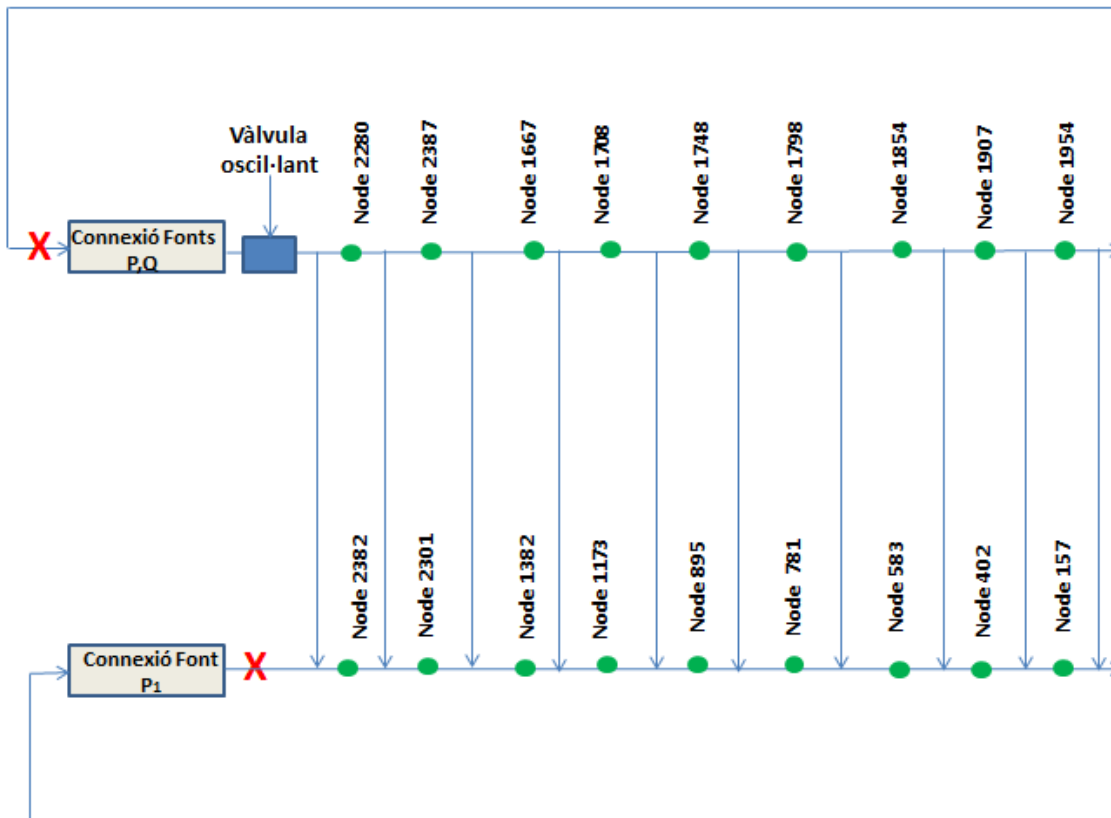


Figura 9.1 Esquema del Booster Ring amb la situació dels nodes.

Per a facilitar la lectura, al llarg dels gràfics els nodes han estat numerats com node 1-2-3-4-5-6-7-8-9, essent el node 1 l'equivalent al node 2280 pel primer anell, el node 2 és l'equivalent al node 2387 i així successivament fins a arribar al node 9 que és l'equivalent al node 1954 (node més allunyat de l'anell superior). Pel segon anell s'ha seguit la mateixa nomenclatura. El node 1 del segon anell és l'equivalent al node 2382, el node 2 del segon anell és l'equivalent al node 2301 i així successivament.

D'aquesta manera en els gràfics s'indica primerament si els nodes d'estudi pertanyen al primer o al segon anell i seguidament es numeren com node d'1 a 9 en funció de la posició que ocupen en l'anell.

9.2. Anell superior

Primerament, com s'il·lustra a la Figura 9.2, s'han realitzat simulacions per un elevat rang de freqüències per realitzar un primer estudi de la resposta freqüencial. Les freqüències escollides han estat 0,5 Hz-1,3 Hz-2,5 Hz-4 Hz- 5 Hz-10 Hz-20 Hz.

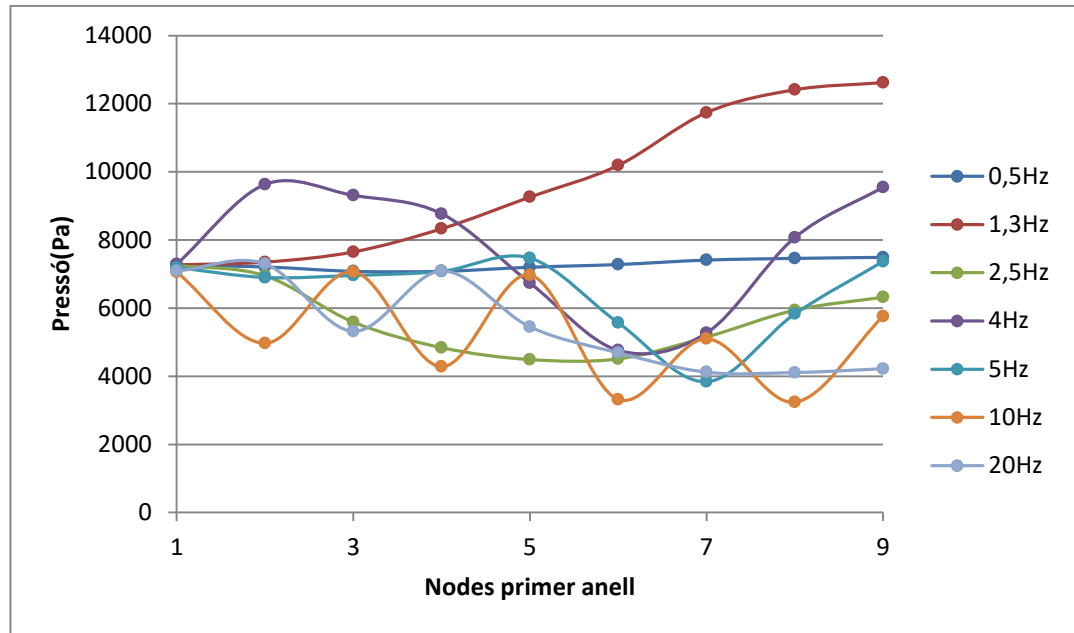


Figura 9.2 Representació gràfica de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió als nodes del primer anell.

Es pot observar un comportament diferent en funció de la freqüència estudiada:

- Per 0,5 Hz, freqüències baixes, l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió es manté constant.
- Per 1,3 Hz aquesta amplitud augmenta a mesura que s'avança en l'anell.
- Per 2,5 Hz l'amplitud de la pressió descendeix en els primers nodes per després tornar a augmentar als nodes posteriors.
- Per 4 Hz l'amplitud de la pressió augmenta pels primers nodes, descendeix pels nodes entremitjos i finalment torna a augmentar als nodes finals.
- Aquest comportament oscil·latori també es fa patent a 5 Hz però sobretot a 10 Hz on es presenta un comportament totalment oscil·latori: L'amplitud de les oscil·lacions de la pressió descendeix al segon node de l'anell, augmenta al tercer, torna a descendir al quart i així successivament.

A continuació, a la Figura 9.3, es presenta un gràfic on es canvien coordenades i ordenades, per poder fer més patent l'evolució de la fluctuació de la pressió al llarg de les diferents

freqüències. Es pot observar el que s'havia comprovat a la *Figura 9.2*. Els nodes presenten un màxim d'amplitud a 1,3 Hz, aquest màxim augmenta a mesura que el node està en una posició més allunyada de l'anell. També s'observa que per alguns nodes es presenta un màxim a la freqüència de 4 Hz, concretament els nodes que es troben a posicions inicials i finals de l'anell.

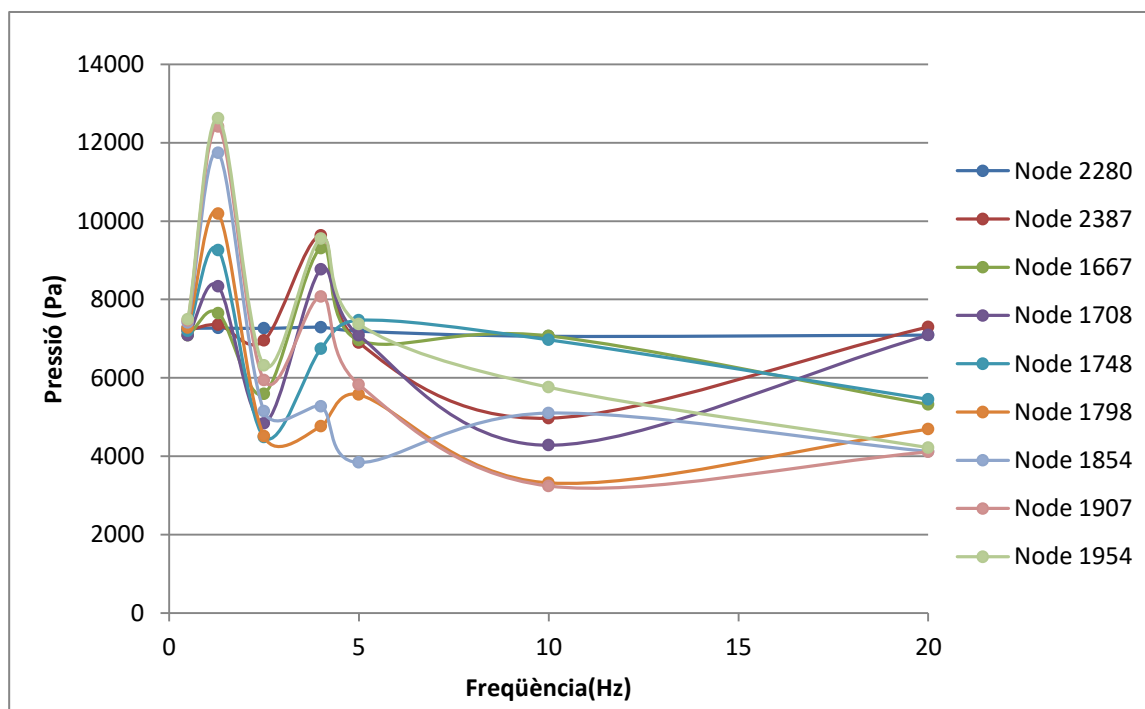


Figura 9.3 Representació gràfica de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió als nodes del primer anell.

9.2.1. Determinació de la freqüència que maximitza la resposta

S'ha observat que l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió presenta un màxim al voltant d'1,3 Hz. La *Figura 9.4* presenta un estudi més detallat de les freqüències properes a 1,3 Hz per veure l'evolució d'aquest màxim i a quina freqüència està situat exactament.

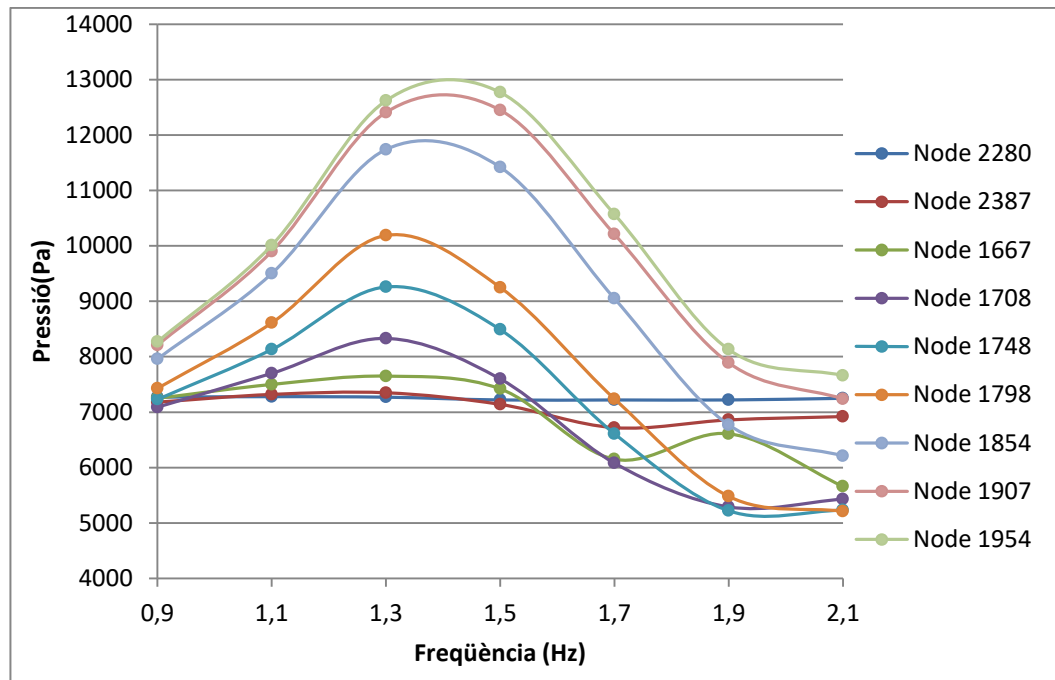


Figura 9.4 Representació gràfica de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió al voltant d'1,3 Hz.

La Figura 9.4 mostra el següent comportament:

- Per 0,9 Hz el comportament és similar al vist anteriorment per 0,5 Hz, l'amplitud es manté constant al llarg de l'anell. En aquest cas però, a mesura que s'estudien nodes en una posició final de l'anell (node 1854, 1907 i 1954) l'amplitud augmenta lleugerament.
- A mesura que s'augmenta la freqüència l'amplitud augmenta, fins a arribar a 1,3Hz on presenta un màxim. Cal notar que pels dos últims nodes, el node 1907 i el node 1954, aquest màxim estaria situat a 1,5 Hz.
- Un cop s'arriba a la freqüència de 1,3 Hz l'amplitud disminueix de forma lineal.

9.2.2. Evolució de la fluctuació de la pressió entre 1,3 Hz i 4 Hz

En la Figura 9.3 s'han determinat dues freqüències que amplifiquen de forma significativa l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió:

- 1,3 Hz amplifica l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió per a tots els nodes de l'anell.

- 4 Hz amplifica l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió solament per a uns nodes concrets.

Per observar com evoluciona la fluctuació de la pressió entre aquestes dues freqüències, la *Figura 9.5* il·lustra l'evolució de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió per diferents freqüències compreses entre 1,3 Hz i 4 Hz.

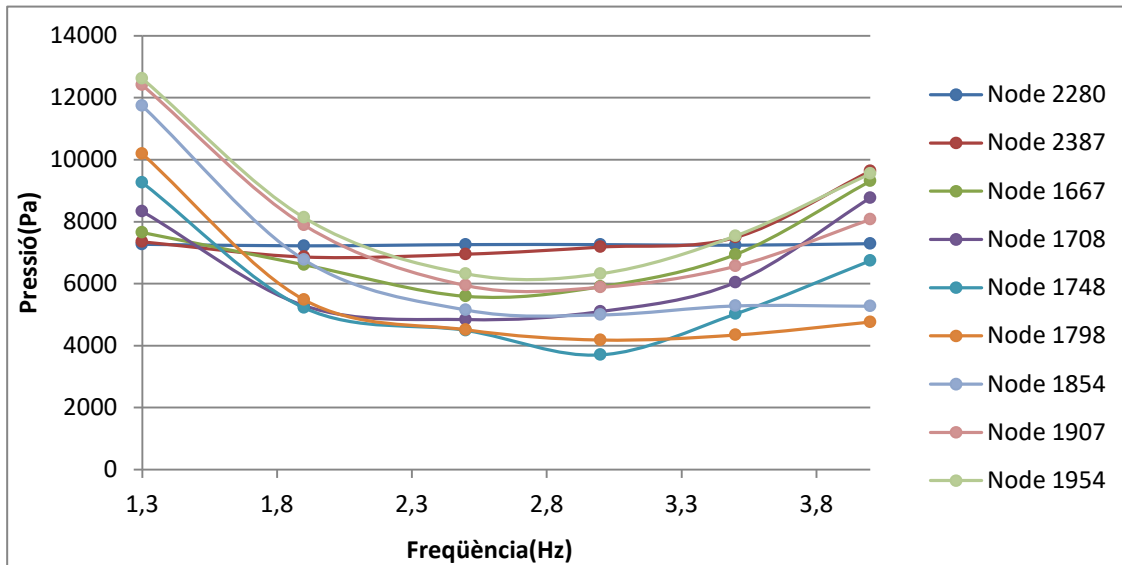


Figura 9.5 Representació gràfica de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió entre 1,3 Hz i 4 Hz.

El gràfic denota una forma de U, amb les següents característiques:

- Presenta un màxim en 1,3 Hz.
- A partir d'1,3 Hz els valors disminueixen fins que entre 2,5 Hz i 3 Hz s'arriba a un mínim i a partir d'aquestes freqüències l'amplitud de la pressió augmenta de nou.
- Notar però, que aquest augment per les últimes freqüències (3,5 Hz i 4 Hz) depèn en gran mesura del node estudiat. Així per nodes situats en una posició mitjana de l'anell (els nodes 1798 i 1854) aquest augment és gairebé inexistent, mentre que pels nodes situats o bé al principi o bé al final de l'anell aquest augment resulta molt més significatiu.

9.3. Anell inferior

Igual que s'ha fet pel primer anell; es començarà amb un estudi per un ampli grup de freqüències. Les freqüències escollides novament per aquest primer estudi són: 0,5 Hz-1,3 Hz-2,5 Hz-4 Hz-5 Hz-10 Hz-20 Hz. La *Figura 9.6* compara l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió pels nodes escollits en el punt 9.1 del segon anell per les diferents freqüències esmentades.

Cal notar que aquest segon anell, com s'il·lustra en la *Figura 9.1*, finalitza connectat a una font de pressió constant. És per aquest motiu que els últims nodes presenten un valor d'oscil·lació de la pressió més baix. De fet, si s'agafés un node més pròxim a la font de pressió, es comprovaria que l'oscil·lació és pràcticament inexistent.

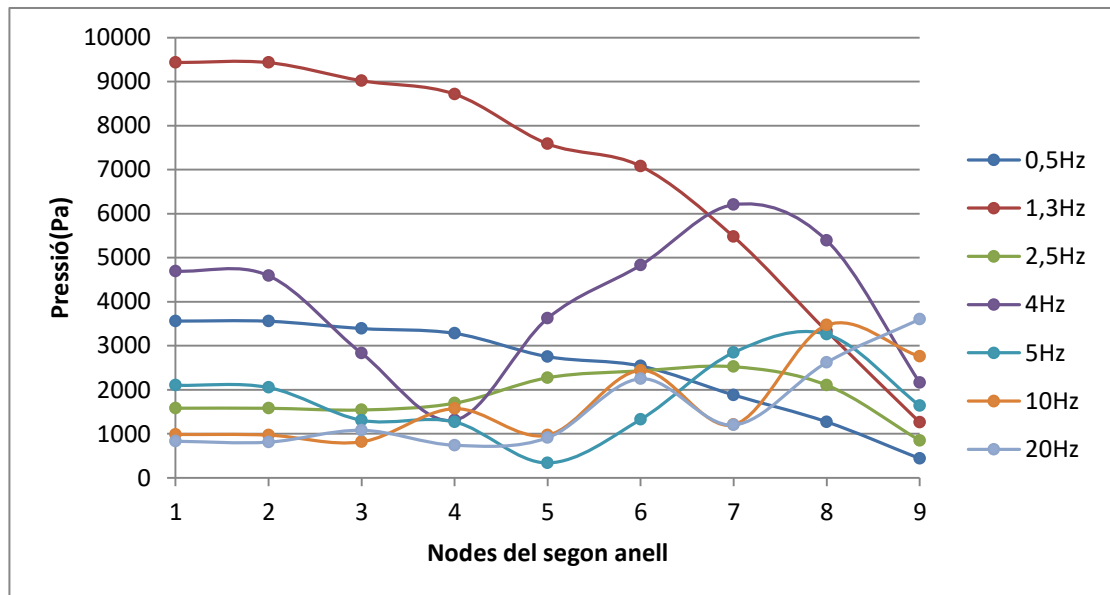


Figura 9.6 Representació gràfica l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió pels nodes del segon anell.

El gràfic mostra el que s'ha comentat anteriorment. Quan s'estudien els darrers nodes de l'anell, a causa d'aquesta connexió amb la font de pressió constant, les fluctuacions de la pressió s'atenuen:

- Per a freqüències més baixes (0,5 Hz i 1,3 Hz), la disminució és constant al llarg de l'anell.
- Per freqüències més altes es torna a presentar un caràcter més oscil·latori.

La *Figura 9.7* mostra el mateix gràfic intercanviant ordenades i coordenades:

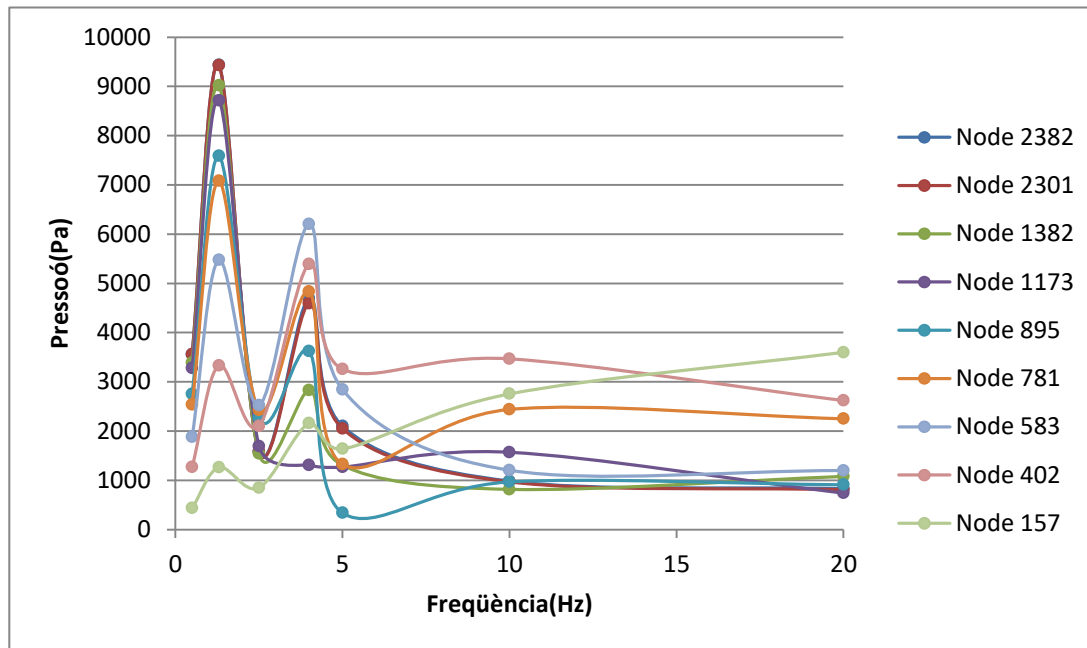


Figura 9.7 Representació gràfica l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió pels nodes del segon anell.

El comportament és similar als nodes del primer anell, ja que les oscil·lacions de la pressió presenten els màxims en 1,3 Hz i 4 Hz. Es pot observar que pels darrers nodes de l'anell és a més altes freqüències (10 Hz i 20 Hz) on presenten el seu màxim, probablement a causa del caràcter oscil·latori que aquestes freqüències tenen associades.

9.3.1. Determinació de la freqüència que maximitza les oscil·lacions de la pressió pel segon anell

Es passa ara a comprovar, com s'ha realitzat en el punt 9.2.1, per quina freqüència és màxima l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió. Per aquest motiu es realitza un estudi a les freqüències properes a 1,3 Hz, com s'il·lustra en la *Figura 9.8*.

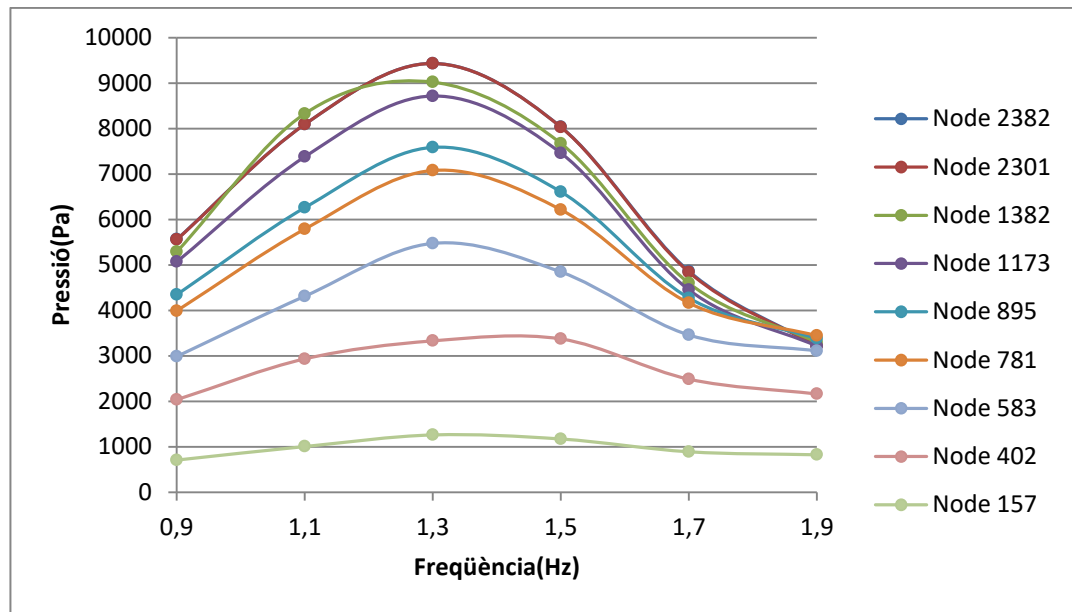


Figura 9.8 Representació gràfica l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió al voltant d'1,3 Hz.

El comportament és molt similar a l'observat en la Figura 9.4:

- El màxim se situa de nou al voltant d'1,3 Hz.
- Als darrers nodes de l'anell (node 402 i node 157), l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió es manté gairebé constant per a totes les freqüències. Aquest fenomen es deu a la connexió del final de l'anell amb una font de pressió que atenua les oscil·lacions.

9.3.2. Evolució de la fluctuació de la pressió entre 1,3 Hz i 4 Hz pel segon anell

En la Figura 9.7, s'han determinat com a freqüències que maximitzen l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió 1,3 Hz i 4 Hz. La Figura 9.9 mostra com evoluciona la fluctuació de la pressió entre aquestes freqüències per als nodes del segon anell.

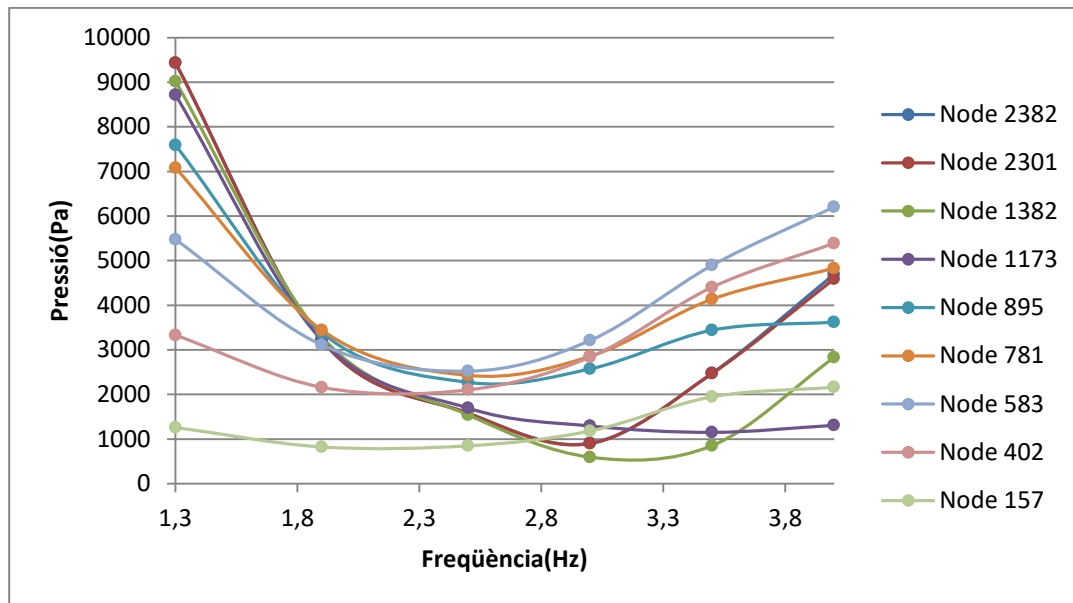


Figura 9.9 Representació gràfica de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió entre 1,3 Hz i 4 Hz.

L'efecte és similar al que s'ha observat en la Figura 9.4 pels nodes del primer anell:

- Els màxims de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió estan situats a 1,3 Hz i 4 Hz.
- El gràfic presenta una forma de U amb un mínim al voltant de 2,5 Hz i 3 Hz.
- La forma de U no es presenta per a tots els nodes. Pels nodes finals de l'anell inferior, el node 402 i sobretot el 157, es presenta un valor constant per a l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió a freqüències pròximes a 1,3 Hz, i a mesura que s'augmenta la freqüència un comportament lineal ascendent.

9.4. Conclusions parcials

Per al primer anell s'ha observat el següent comportament:

- Per baixes freqüències el valor de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió es manté constant al llarg de l'anell.
- A mesura que s'augmenta la freqüència, el valor de l'amplitud d'aquestes oscil·lacions s'incrementa de forma lineal fins a arribar a un màxim a 1,3 Hz.

- A partir d'1,3 Hz, el valor de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió comença a disminuir de nou, fins a arribar a la freqüència de 2,5 Hz, que torna a augmentar arribant a un nou màxim a 4 Hz. Si bé ara l'augment no és de forma constant, sinó que presenta un comportament més oscil·latori, és a dir, al llarg de l'anell aquesta amplitud augmenta i disminueix en funció del node d'estudi. Concretament la fluctuació de la pressió augmenta als nodes inicials de l'anell, disminueix en les posicions mitjanes de l'anell i finalment torna a augmentar en els darrers nodes de l'anell.
- A mesura que s'augmenta la freqüència aquest comportament oscil·latori es fa més patent.

Per al segon anell s'ha observat el següent comportament:

- Per freqüències baixes l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió presenta un comportament descendent al llarg de l'anell constant; ja que el final de l'anell està connectat a una font de pressió que esmorteix les oscil·lacions.
- El comportament és molt similar al del primer anell, presentant l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió un màxim a 1,3 Hz, disminuint fins a 2,5 Hz i tornant a augmentar després presentant un màxim a 4 Hz.
- El comportament oscil·latori per a altes freqüències es torna a repetir de nou, presentant com a fenomen curiós que als nodes finals de l'anell, que és quan el senyal queda atenuat per la resta de freqüències, per altes freqüències presenta un màxim.

9.4.1. Freqüències escollides per realitzar les anàlisis posteriors

Per fer l'estudi amb aire a diferents punts, s'ha escollit un grup de freqüències més reduït en funció dels resultats obtinguts en aquest apartat:

- S'ha escollit primerament 1,3 Hz i 4 Hz, ja que són les freqüències on es situa l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió màxima.
- S'han escollit 2 Hz i 3 Hz per observar el comportament entre 1,3 Hz i 4 Hz.

- S'han escollit 0,5 Hz i 0,9 Hz perquè són freqüències pròximes a 1,3 Hz i per observar l'evolució de la fluctuació de la pressió per a baixes freqüències sota la presència d'aire.
- S'ha escollit 5 Hz per veure com evoluciona el gràfic per sobre de 4 Hz.
- S'ha escollit 10 Hz per observar com evoluciona el comportament de la fluctuació de la pressió a altes freqüències.

A continuació, la *Figura 9.10*, la *Figura 9.11*, la *Figura 9.12* i la *Figura 9.13* presenten els gràfics amb l'evolució de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió per cada freqüència en funció del node i per cada node en funció de la freqüència per als nodes i freqüències escollits per al primer i segon anell sense presència d'aire.

Pel primer anell es presenten els següents dos gràfics:

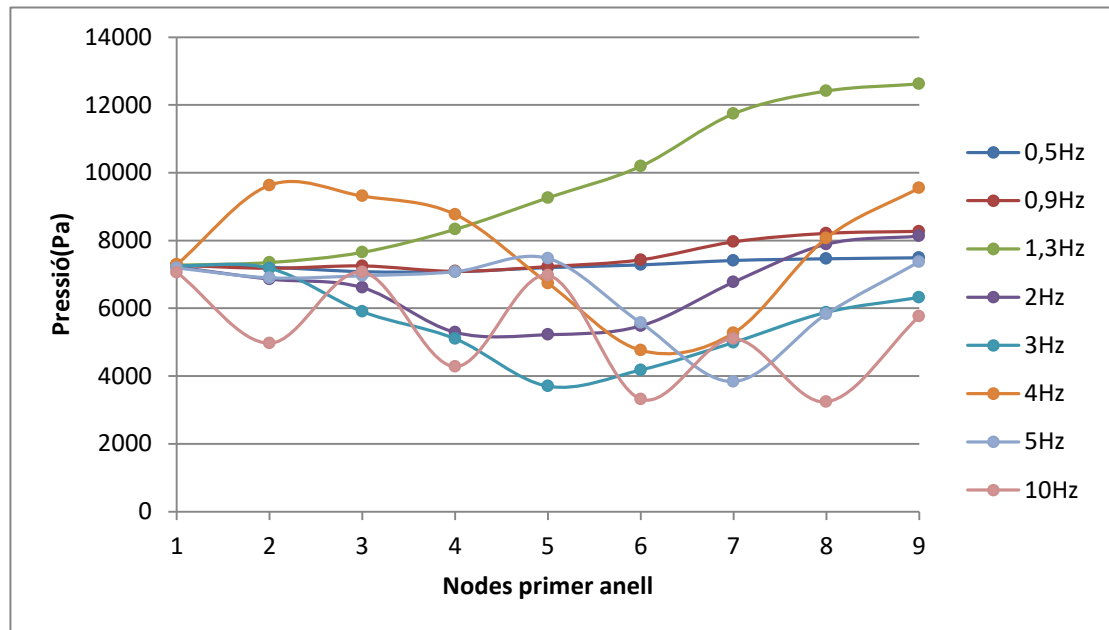


Figura 9.10 Representació gràfica de l'evolució de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió per als nodes del primer anell a les freqüències escollides sense presència d'aire.

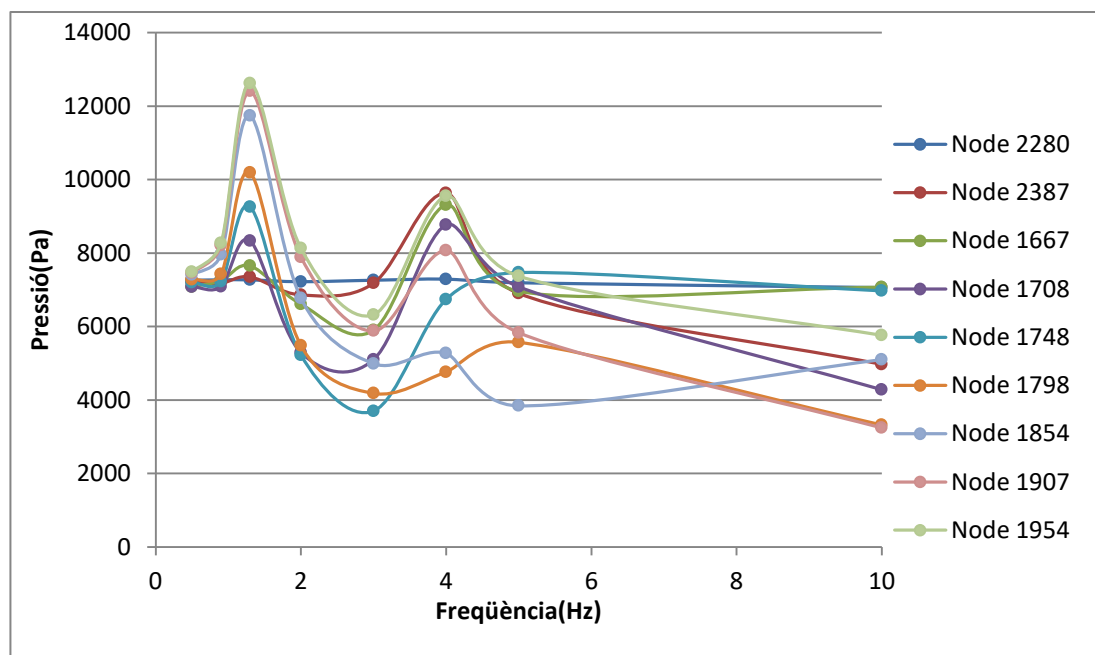


Figura 9.11 Representació gràfica de l'evolució de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió per als nodes del primer anell a les freqüències escollides sense presència d'aire.

Pel segon anell es presenten els següents dos gràfics:

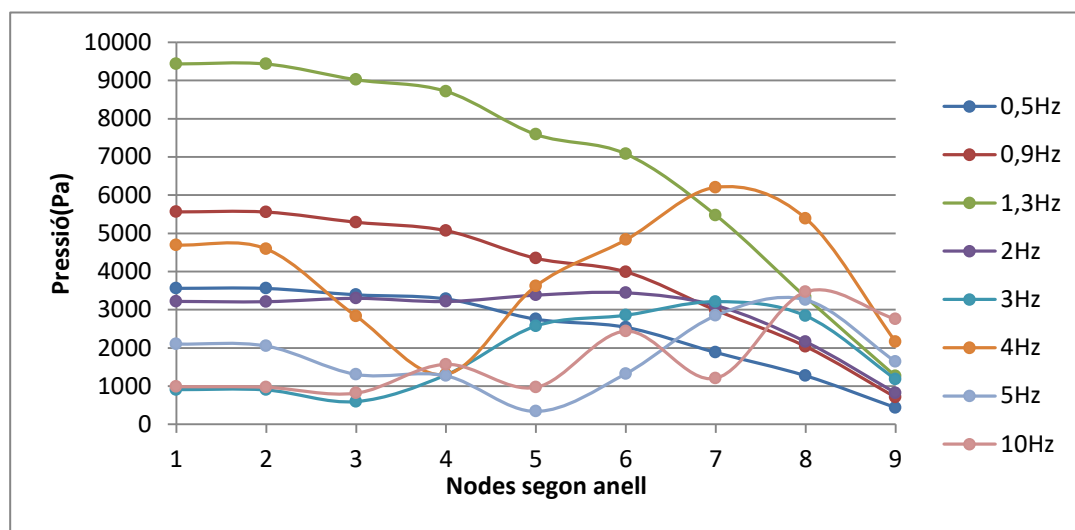


Figura 9.12 Representació gràfica de l'evolució de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió per als nodes del segon anell a les freqüències escollides sense presència d'aire.

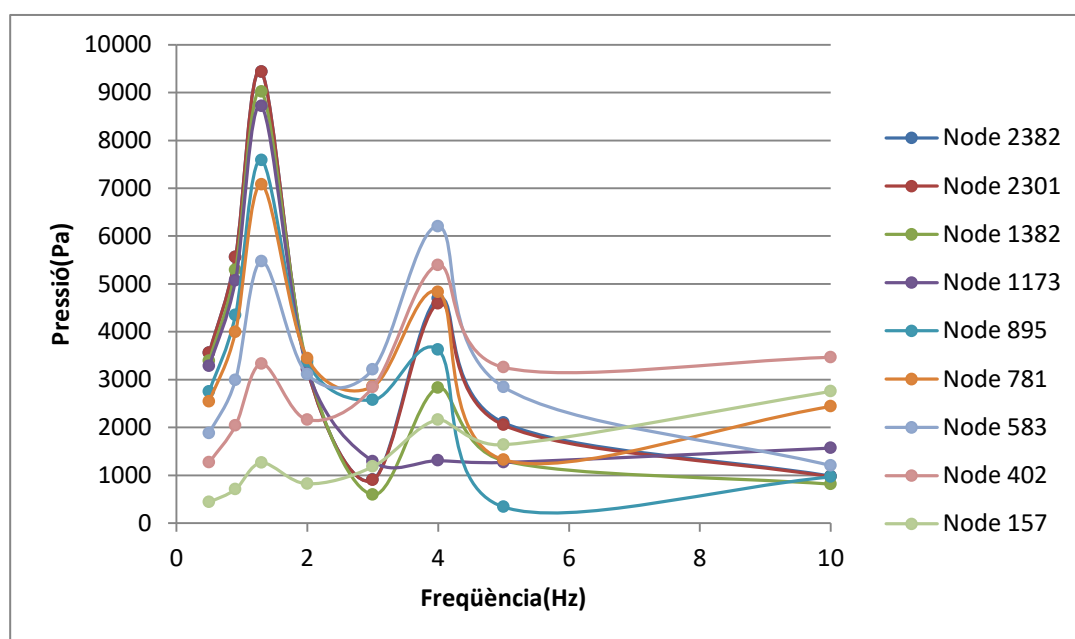


Figura 9.13 Representació gràfica de l'evolució de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió per als nodes del segon anell a les freqüències escollides sense presència d'aire.

10. Resposta del Booster amb aire

10.1. Metodologia

Per simular l'aire a les canonades del Booster Ring s'ha fet servir un component del Flowmaster nomenat *Accumulator air Vessel*. En la *Figura 10.1* es mostra la forma esquemàtica de l'acumulador.

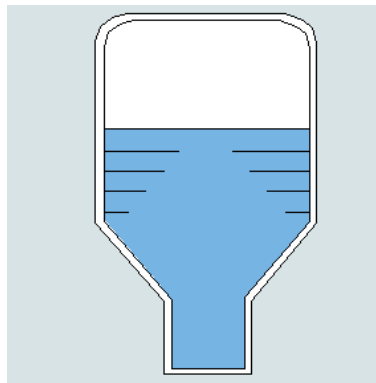


Figura 10.1 Representació esquemàtica acumulador d'aire.

Per caracteritzar l'acumulador s'han definit els següents paràmetres:

- S'han modelitzat les pèrdues de càrrega singulars provocades per l'acumulador amb una constant $K=1$.
- *Liquid Level*=0, de manera que l'acumulador únicament conté aire.
- S'ha ajustat el volum de l'acumulador en funció de si es volia simular una major o menor presència d'aire, a partir dels paràmetres àrea de secció i alçada de l'acumulador.

Pel que fa a l'estudi de la presència d'aire, s'han seguit les següents pautes:

- S'han situat acumuladors d'aire en nodes situats en una posició mitjana-final i final de l'anell superior, concretament en el node 1878 i en el node 1995, la *Figura 10.2* mostra localització dels nodes 1878 i 1995 (nodes pintats en vermell), en l'esquema mostrat prèviament en la *Figura 9.1*. El node 1878 està situat entre els

nodes 1854 i 1907 mentre que el node 1995 està situat a la part final de l'anell superior.

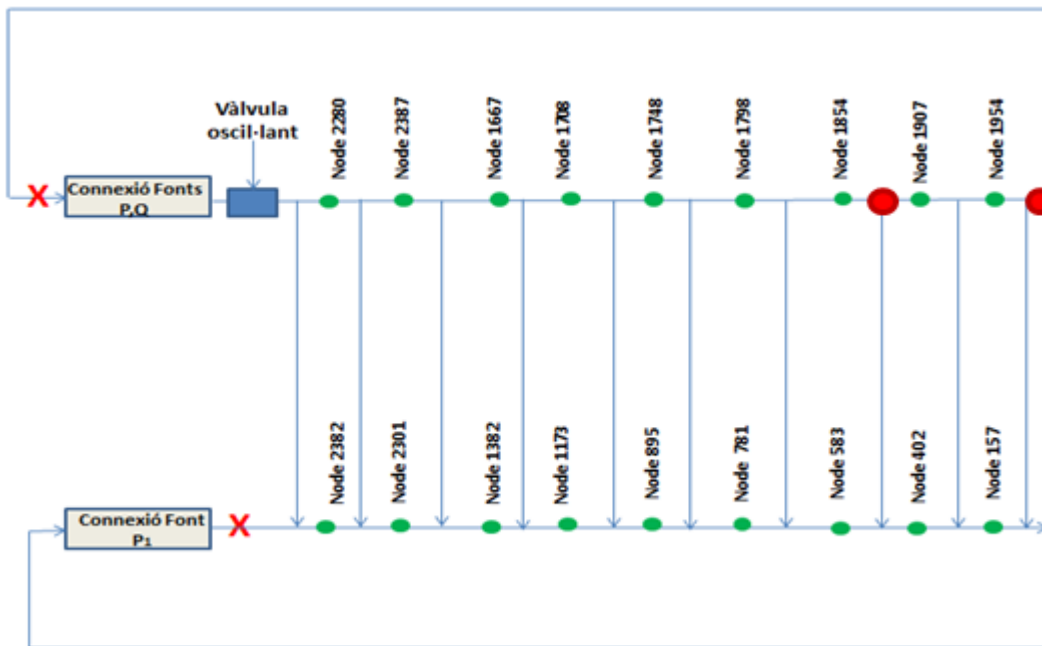


Figura 10.2 Representació esquemàtica del Booster Ring amb la situació dels acumuladors d'aire.

- El volum de l'acumulador d'aire considerat moderat i elevat s'ha estipulat a partir d'un seguit de simulacions realitzades prèviament al model reduït del Booster vist anteriorment al punt 5.
 - Quan al llarg del projecte es parla de presència d'aire moderada es fa referència a una altura de l'acumulador 0,0828 metres i una àrea de secció de $0,005384 \text{ m}^2$.
 - Quan al llarg del projecte es parla de presència d'aire elevada es fa referència a una altura de l'acumulador 0,25 metres i una àrea de secció de $0,005384 \text{ m}^2$.
- S'ha realitzat cada estudi per les freqüències nomenades anteriorment 0,5 Hz, 0,9Hz, 1,3 Hz, 2 Hz, 3 Hz, 4 Hz, 5 Hz i 10 Hz.

Es pretén d'aquesta manera veure com afecta el volum i la situació de l'aire acumulat per diferents freqüències d'oscil·lació de la vàlvula.

10.2. Resultats de les simulacions

10.2.1. Aire al final del primer anell

10.2.1.1. Presència moderada d'aire

Primerament s'ha situat aire acumulat al node 1995, un dels darrers nodes del primer anell. La Figura 10.3 mostra la resposta per totes les freqüències estudiades anteriorment (0,5 Hz, 0,9 Hz, 1,3 Hz, 2 Hz, 3 Hz, 4 Hz, 5 Hz i 10 Hz) amb una presència d'aire moderada.

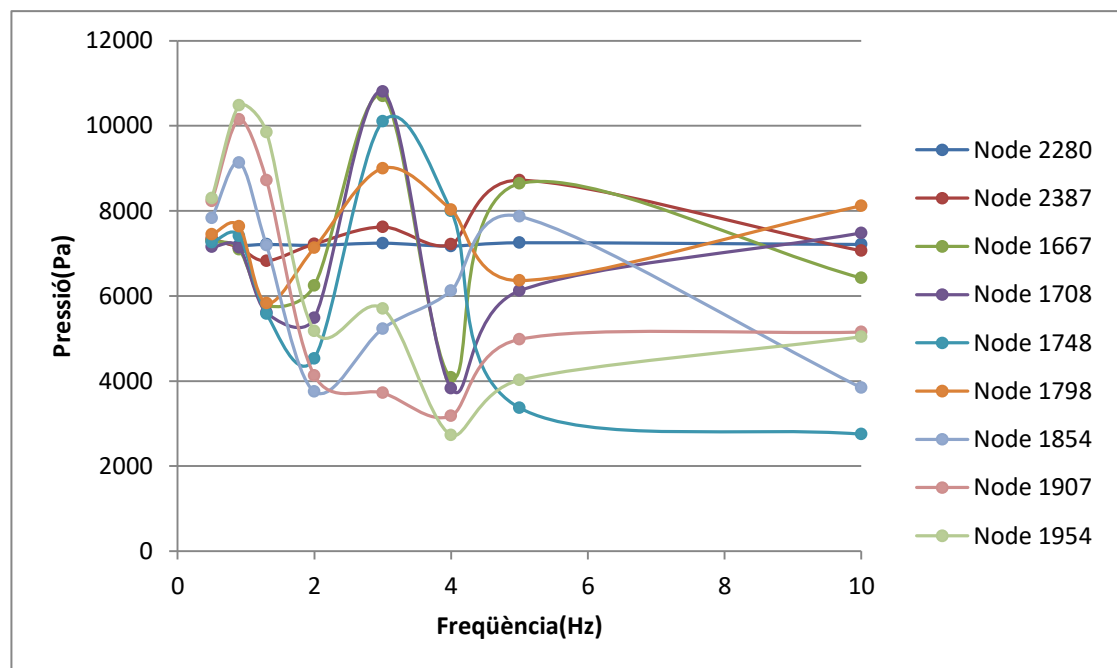


Figura 10.3 Representació gràfica de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió per una presència d'aire moderada acumulada al node 1995.

Al gràfic es pot observar el següent comportament:

- Les amplituds màximes s'han desplaçat cap a freqüències més baixes:
 - El màxim situat anteriorment a 1,3 Hz s'ha desplaçat a 0,9 Hz.
 - 0,5 Hz que abans es mantenia constant ha augmentat lleugerament.
 - El mateix ocorre per 4 Hz, l'amplitud màxima que abans es presentava a 4 Hz s'ha desplaçat ara a 3 Hz.
- Per 10 Hz es continua observant un comportament oscil·latori i un increment notable de l'amplitud, més endavant es farà un estudi més detallat d'aquest comportament.

La *Figura 10.4* mostra de forma més clara aquest canvi en l'amplitud màxima al voltant d'1,3Hz:

- Per als primers nodes de l'anell el valor de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió es manté constant per 0,5 Hz i 0,9 Hz, mentre que presenta un descens notable al voltant d'1,3 Hz.
- Per als nodes finals de l'anell el valor de l'amplitud augmenta per totes les freqüències, però el màxim es presenta per 0,9 Hz.

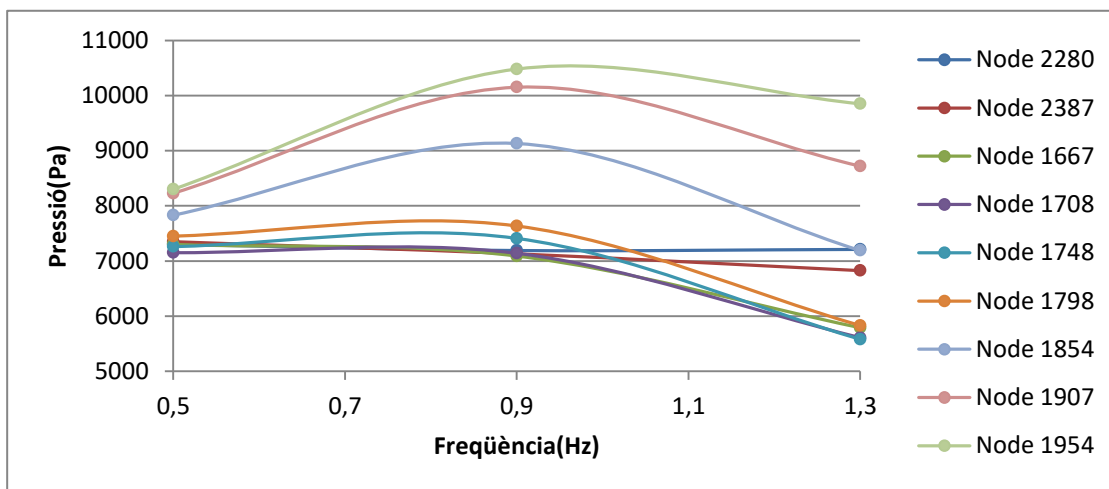


Figura 10.4 Representació gràfica de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió per a baixes freqüències.

La *Figura 10.5* il·lustra el desplaçament del màxim d'amplitud per 4 Hz a 3 Hz, notar que aquest desplaçament no ocorre per la totalitat dels nodes com en el cas de la *Figura 10.4*. En aquest cas el node 1854 presenta un comportament lineal ascendent al llarg de totes les freqüències; mentre que el node 1907 presenta un comportament lineal descendent.

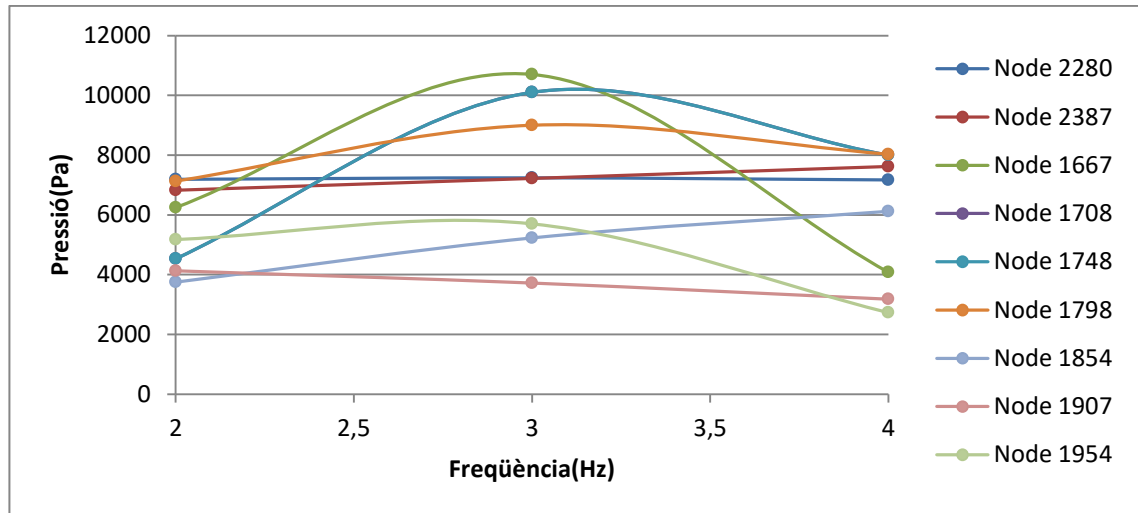


Figura 10.5 Representació gràfica de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió entre 2 Hz i 4 Hz.

10.2.1.2. Presència elevada d'aire

La Figura 10.6 mostra l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió per als nodes del primer anell. S'ha acumulat una quantitat d'aire elevada en node 1995.

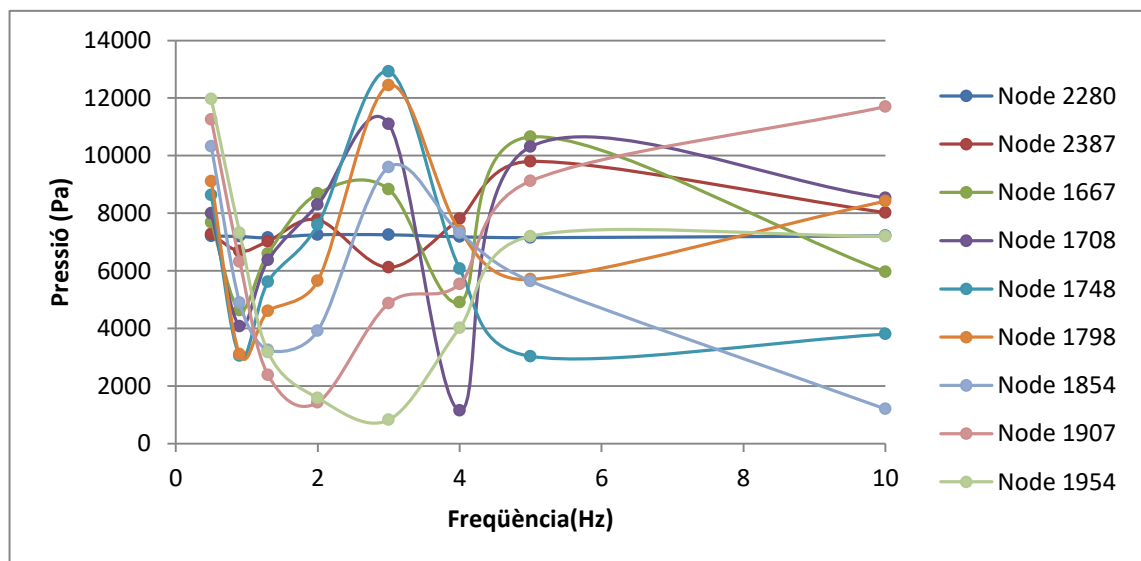


Figura 10.6 Representació gràfica de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió per una presència d'aire elevada acumulada al node 1995.

Al gràfic es pot observar el següent comportament:

- L'amplitud màxima que anteriorment es trobava a 1,3 Hz sense presència d'aire i a 0,9 Hz per una presència d'aire moderada s'ha desplaçat ara a 0,5 Hz. S'observa una correlació en què a mesura que s'augmenta la presència d'aire

l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió màxima es dona per freqüències cada vegada més baixes.

- El màxim situat a 3 Hz es manté amb la peculiaritat que les amplituds han augmentat. Amb una presència d'aire moderada l'amplitud màxima era de l'ordre de 10500 Pa i ara arriba a superar els 12.000 Pa.
- Es pot comprovar que 10 Hz, que ja sense aire mostrava un comportament oscil·latori, augmenta l'amplitud d'aquestes oscil·lacions a mesura que augmenta la presència d'aire.

També notar que per altes freqüències, aquells nodes on sense presència d'aire l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió era màxima, amb presència d'aire és mínima, i en canvi si l'amplitud sense presència d'aire era mínima, ara és màxima. Les *Figures 10.7 i 10.8* il·lustren aquest comportament d'inversió de màxims i mínims per les freqüències de 4 Hz i 10 Hz. Per a 10 Hz aquest fenomen d'inversió va acompanyat d'un clar augment de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió.

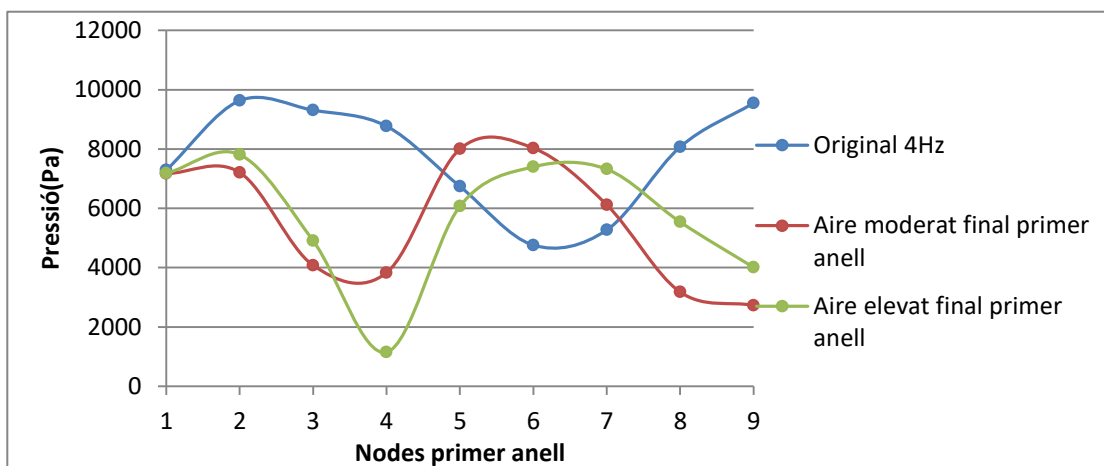


Figura 10.7 Representació gràfica de l'evolució de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió per a 4 Hz als nodes del primer anell.

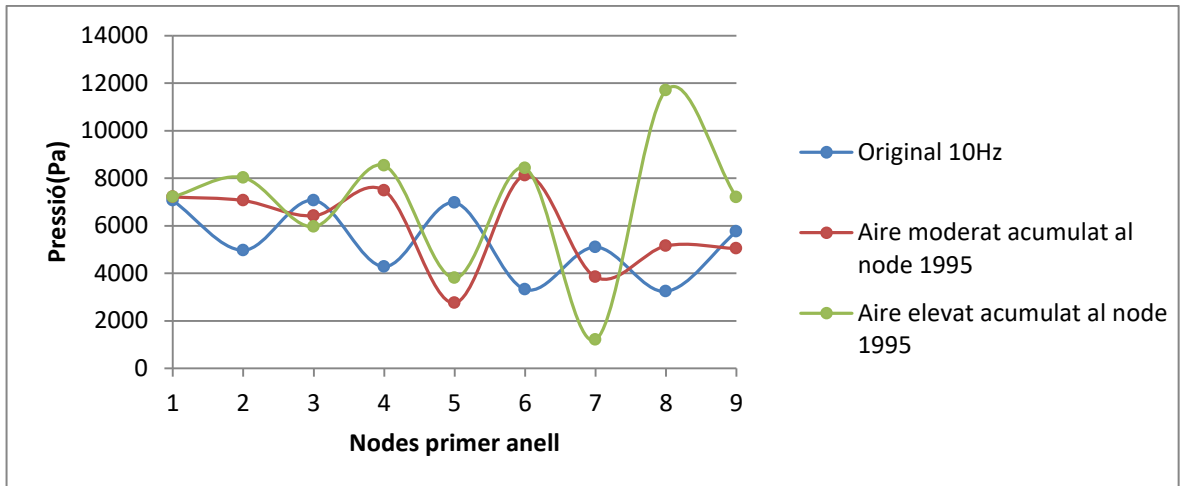


Figura 10.8 Representació gràfica de l'evolució de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió per a 10 Hz als nodes del primer anell.

10.2.1.3. Efecte als nodes del segon anell

Es passa ara a estudiar els efectes que l'aire acumulat al final del primer anell, concretament en el node 1995, produeix per a l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió en els nodes del segon anell. La Figura 10.9 mostra l'efecte en les fluctuacions de la pressió pels nodes del segon anell causat per una presència d'aire moderada acumulada al node 1995.

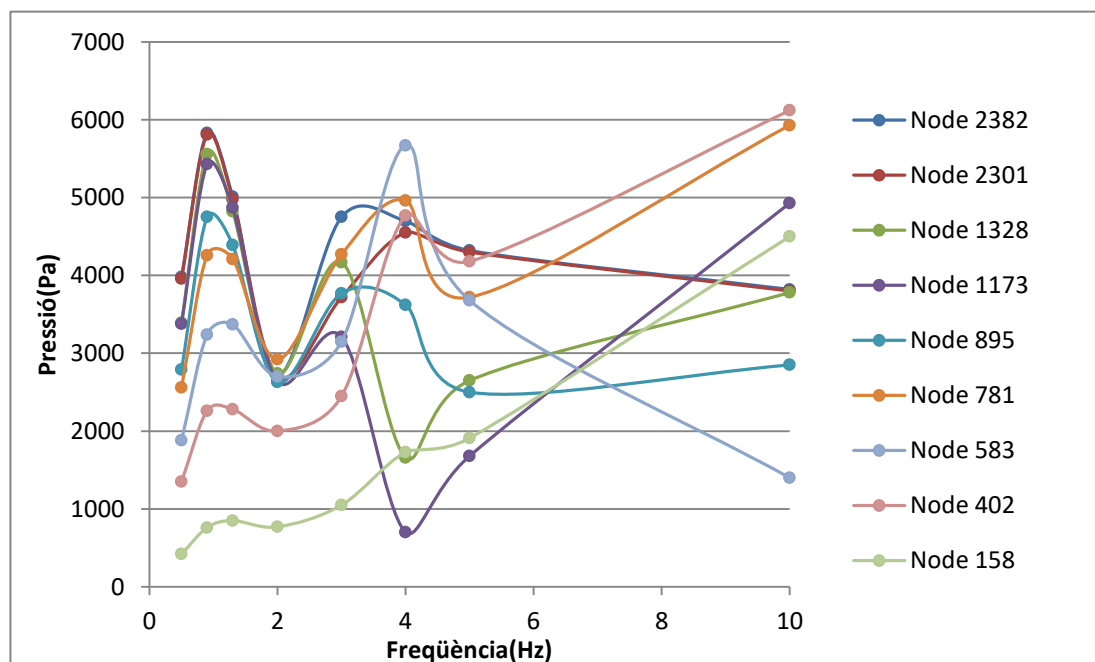


Figura 10.9 Representació gràfica de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió per una presència d'aire moderada acumulada al node 1995 en els nodes del segon anell.

Al gràfic es pot observar el següent comportament:

- L'amplitud màxima s'ha desplaçat de nou d'1,3 Hz a 0,9 Hz.
- 3 Hz i 4 Hz presenten també diversos màxims per l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió.
- 10 Hz presenta un caràcter oscil·latori més amplificat, essent màxima l'amplitud de la pressió en alguns nodes i mínima en altres.
- Per baixes freqüències, l'amplitud disminueix a mesura que s'avança al llarg de l'anell. Aquest efecte no ocorre per altes freqüències, on el valor de l'amplitud presenta un valor més oscil·latori. Aquest comportament oscil·latori queda millor reflectit si es canvien coordenades i ordenades, com s'observa en la *Figura 10.10*.

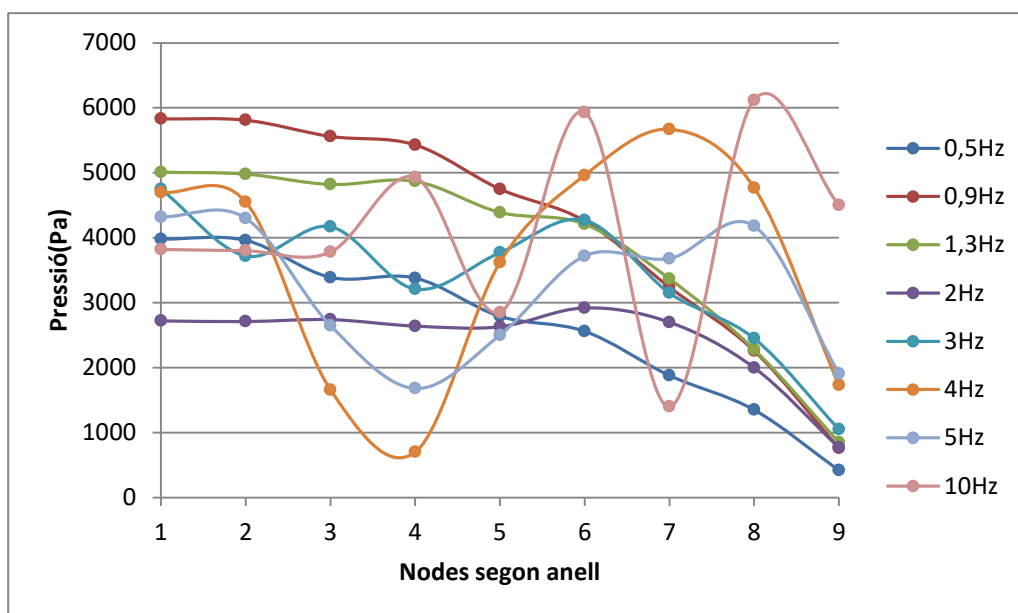


Figura 10.10 Representació gràfica de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió per una presència d'aire moderada acumulada al node 1995 en els nodes del segon anell.

Al gràfic es pot apreciar de forma més clara aquest augment del caràcter oscil·latori per 10Hz. Tot i això el comportament és similar l'observat anteriorment en la *Figura 9.11*.

La *Figura 10.11* mostra l'efecte produït per una presència d'aire elevada acumulada en el node 1995 als nodes del segon anell.

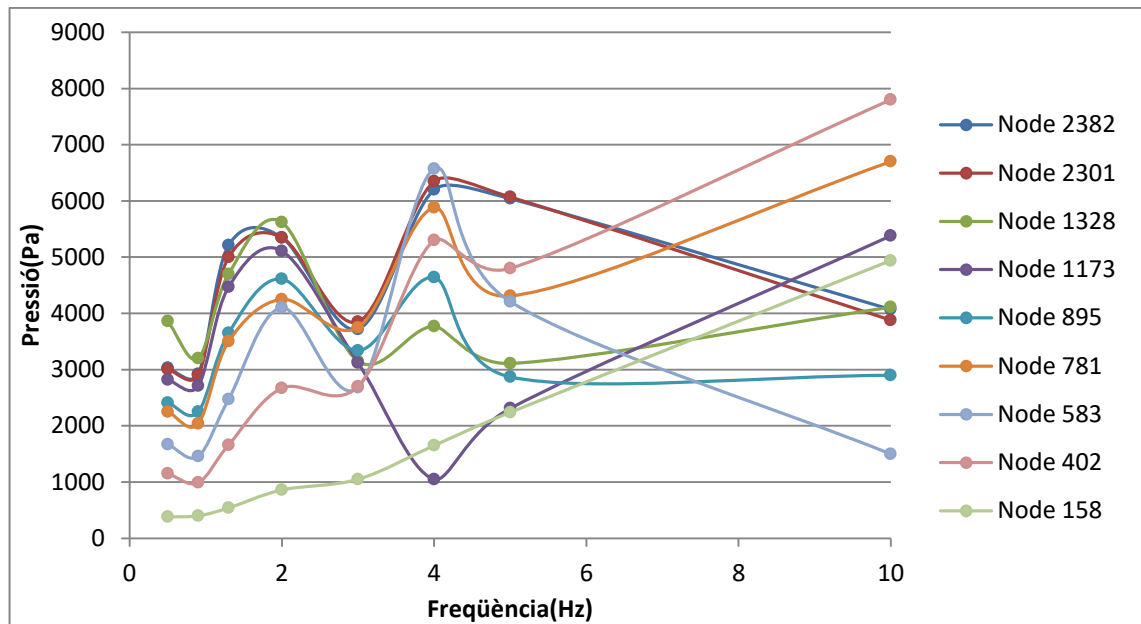


Figura 10.11 Representació gràfica de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió per una presència d'aire elevada acumulada al node 1995 en els nodes del segon anell.

En el gràfic es pot observar el següent comportament:

- L'efecte de l'aire distorsiona en aquest cas molt més el senyal en comparació al gràfic on es tenia una presència moderada d'aire, gràfic que tenia una aparença similar al que no tenia presència d'aire.
- En aquest cas el primer màxim d'amplitud es té a 2 Hz (s'ha desplaçat d'1,3 Hz cap a una freqüència més alta en lloc d'una freqüència més baixa).
- Es té un segon màxim a 4 Hz.
- 10 Hz segueix presentant un comportament oscil·latori, però ara amb una major amplitud. Si es canvien coordenades i ordenades es pot apreciar millor aquest comportament, com il·lustra la Figura 10.12.

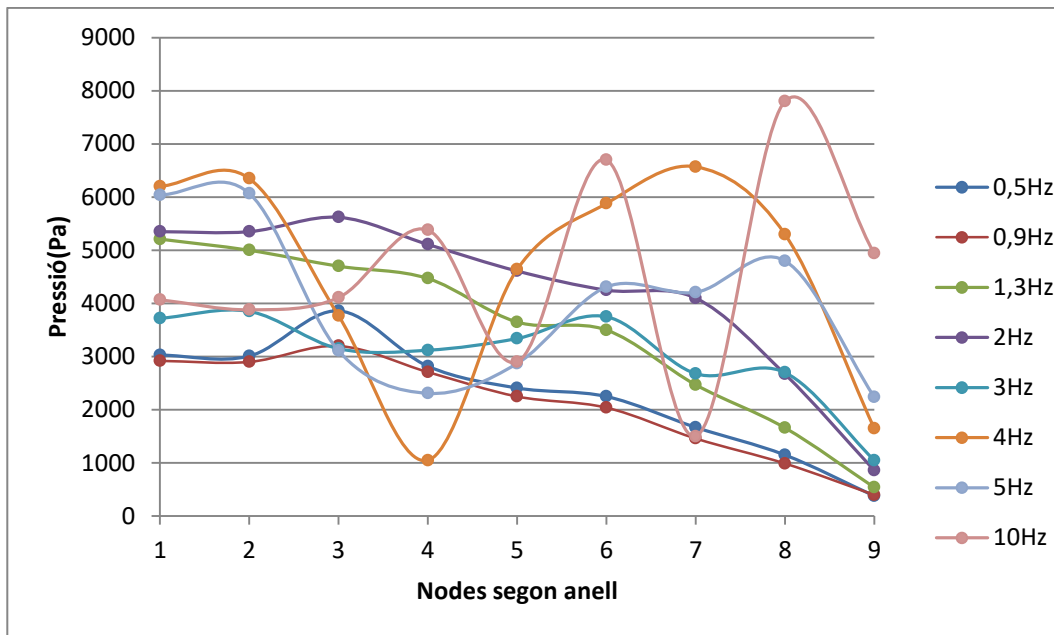


Figura 10.12 Representació gràfica de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió per una presència d'aire elevada acumulada al node 1995 en els nodes del segon anell.

Un cop vist el comportament general als nodes del segon anell, es passa a comprovar si el fenomen d'inversió dels màxims que s'havia vist en les Figures 10.7 i 10.8 que ocorria per altes freqüències al primer anell se segueix donant al segon anell. La Figura 10.13 il·lustra l'evolució de les fluctuacions de la pressió per una freqüència de 10 Hz en els nodes del segon anell.

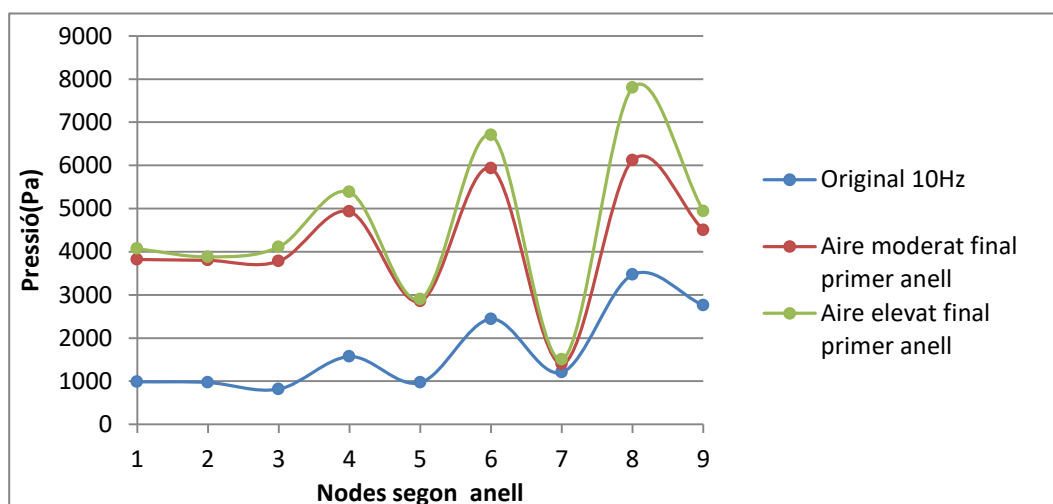


Figura 10.13 Representació gràfica de l'evolució de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió per a 10 Hz als nodes del segon anell.

En el gràfic es pot observar el següent comportament:

- La presència d'aire amplifica l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió.
- No es mostra cap fenomen d'inversió, l'aire simplement actua com amplificador de les oscil·lacions de l'amplitud de la pressió.

10.2.2. Aire mig-final del primer anell

10.2.2.1. Presència moderada d'aire

Després de realitzar l'anàlisi amb l'aire acumulat a una posició final del primer anell s'ha procedit a realitzar la mateixa anàlisi acumulant l'aire en una posició mitjana-final de l'anell; concretament en el node 1878. La *Figura 10.14* analitza l'evolució de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió pels nodes del primer anell per una presència moderada d'aire acumulada en el node 1878.

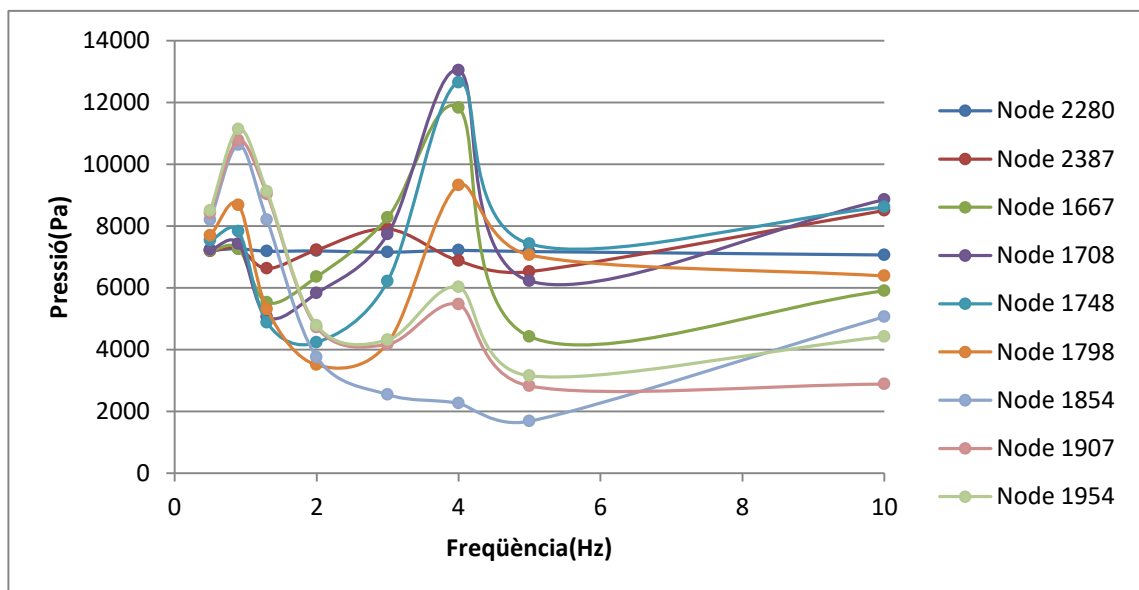


Figura 10.14 Representació gràfica de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió per una presència d'aire moderada al node 1878.

El gràfic mostra el següent comportament:

- Per a baixes freqüències el comportament és idèntic al que es tenia per l'aire acumulat al node 1995; l'amplitud màxima es desplaça d'1,3 Hz a 0,9 Hz.

- Respecte a freqüències més elevades, el comportament difereix del vist anteriorment. L'amplitud màxima que anteriorment s'havia desplaçat a 3 Hz es manté ara a 4 Hz, que era un dels màxims sense presència d'aire. Aquest màxim a 4 Hz s'amplifica arribant ara a superar els 12.000 Pa.
- Per a 10 Hz es torna a amplificar el comportament oscil·latori, però sense provocar el fenomen d'inversió (com es veurà més endavant).

La *Figura 10.15* mostra de forma més clara aquest desplaçament del màxim d'1,3 Hz a 0,9 Hz:

- S'observa un manteniment del valor de l'amplitud de la pressió per als primers nodes de l'anell per 0,5 Hz i 0,9 Hz i un descens a 1,3 Hz.
- Per als nodes posteriors, els valors s'incrementen per a totes les freqüències, però el màxim es situa a 0,9 Hz.
- Es pot comprovar que el comportament per aquestes baixes freqüències és molt similar al de la *Figura 10.4*, on l'aire estava acumulat al final de l'anell.

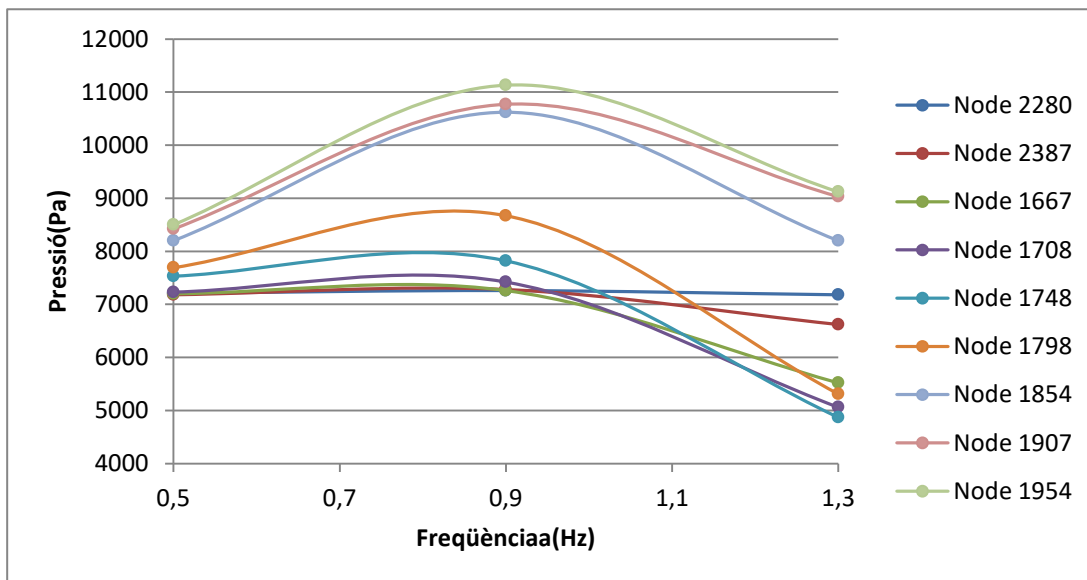


Figura 10.15 Representació gràfica de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió per a baixes freqüències.

La *Figura 10.16* mostra l'evolució de la pressió entre 2 Hz i 4 Hz.

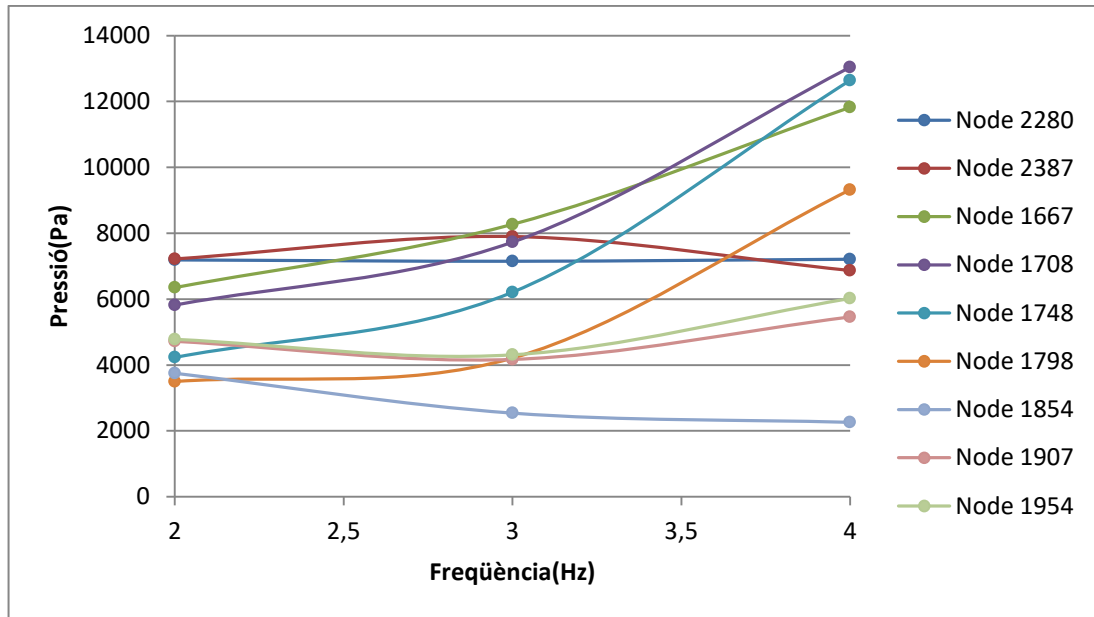


Figura 10.16 Representació gràfica de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió entre 2 Hz i 4 Hz.

En el gràfic es pot observar:

- Un màxim de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió situat ara al voltant de 4Hz.
- Aquest màxim es dona pels nodes situats a una posició inicial i mitjana de l'anell. Per als últims nodes de l'anell el valor de l'amplitud es manté lleugerament constant i inclús disminueix en el cas del node 1854.

10.2.2.2. Presència elevada d'aire

La Figura 10.17 mostra l'evolució de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió per una presència d'aire elevada acumulada al node 1878.

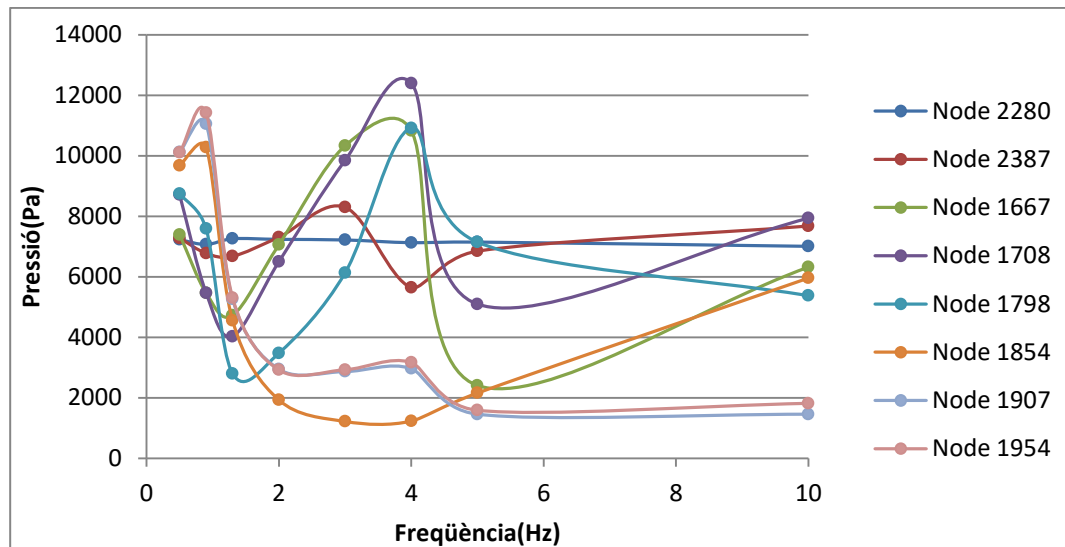


Figura 10.17 Representació gràfica de la pressió amb una presència d'aire elevada al node 1878 per als nodes del primer anell.

El gràfic mostra el següent comportament:

- Per freqüències baixes augmenta l'amplitud per 0,5 Hz però el màxim continua mantenint-se a 0,9 Hz on l'amplitud ha augmentat lleugerament.
- L'amplitud de les oscil·lacions de la pressió ha augmentat també per 3 Hz i disminuït lleugerament per 4 Hz, però continua mantenint el màxim a 4 Hz.
- L'amplitud de les oscil·lacions de la pressió per una freqüència de 10 Hz continua presentant un caràcter oscil·latori a mesura que s'avança al llarg de l'anell.

Pel que fa al fenomen que s'havia vist anteriorment on la presència d'aire invertia per altes freqüències nodes on l'amplitud era màxima, sembla que ara no ocorre, com es mostra a les *Figures 10.18 i 10.19*. Aquestes figures mostren l'evolució de l'amplitud al llarg dels nodes de l'anell superior per 4 Hz i 10 Hz respectivament. L'aire en tot cas actua lleugerament com amplificador de les fluctuacions de la pressió, però el fenomen d'inversió que es mostrava per a les *Figures 10.7 i 10.8* no ocorre.

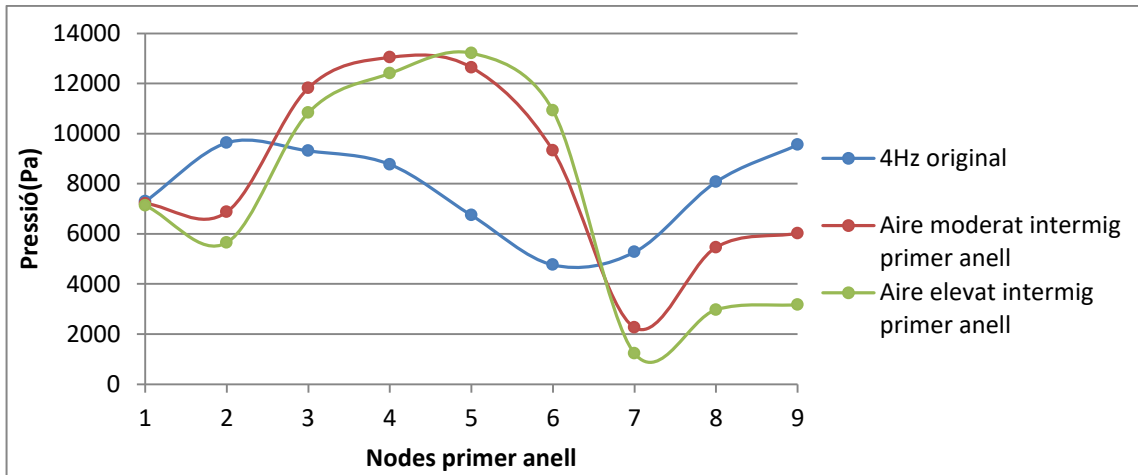


Figura 10.18 Representació gràfica de l'evolució de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió per a 4Hz als nodes del primer anell.

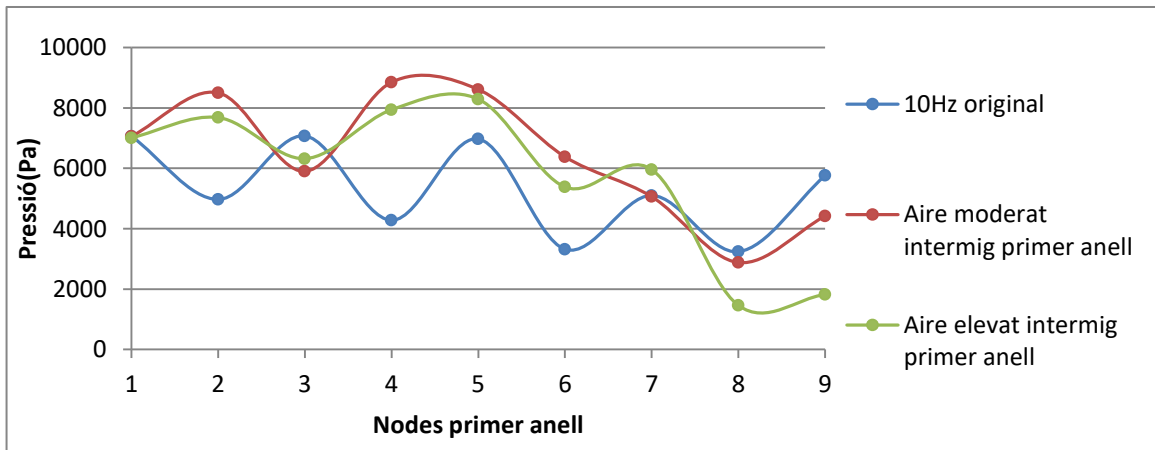


Figura 10.19 Representació gràfica de l'evolució de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió per a 10 Hz als nodes del primer anell.

10.2.2.3. Efecte als nodes del segon anell

La Figura 10.20 mostra l'afectació de l'aire per als nodes del segon anell, acumulat aquest en el node 1878.

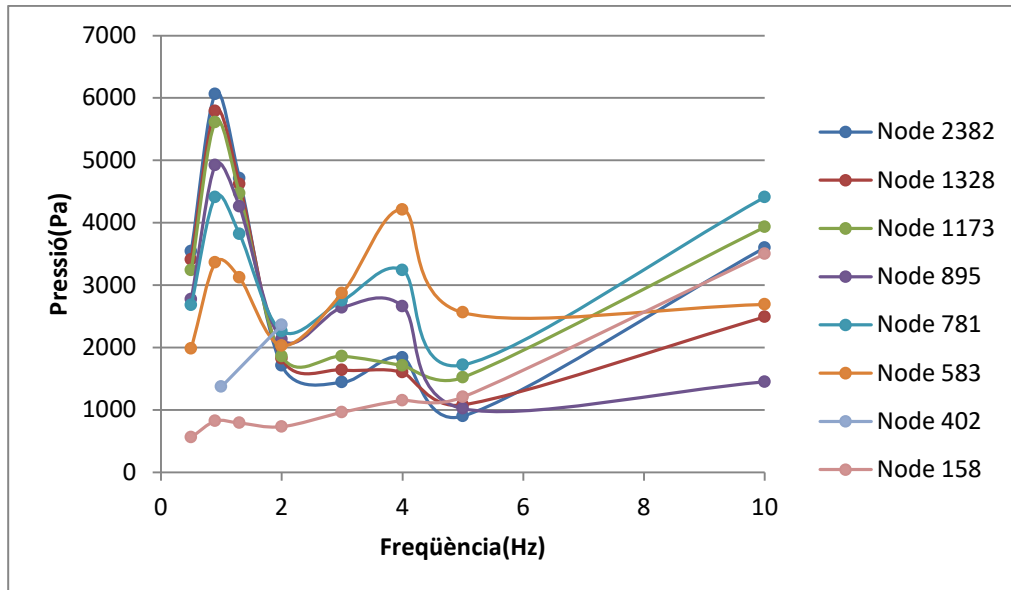


Figura 10.20 Representació gràfica de l'efecte d'una presència d'aire moderada acumulat en una posició mitjana del primer anell en els nodes del segon anell.

El gràfic mostra el següent comportament:

- Comportament similar al vist pel cas anterior d'aire situat al final del primer anell, presentant de nou els màxims d'amplitud a 0,9 Hz i 4 Hz.
- L'amplitud és superior a 0,9 Hz mentre que en el cas anterior era 4 Hz la freqüència predominant.
- S'observa també que 10 Hz continua presentant un comportament oscil·latori; però en aquest cas d'amplitud menor al vist en els casos anteriors.

11. Comparativa sense aire i amb aire

En l'apartat anterior s'ha observat que la presència d'aire desplaça el màxim de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió que originalment es situava a la freqüència d'1,3 Hz a freqüències més baixes indiferentment de la situació de l'aire. Aquest apartat pretén realitzar un estudi per diversos nodes amb diferents configuracions d'aire amb l'objectiu de trobar algun sistema que permeti detectar a quina zona es troba acumulat l'aire. Notar que s'ha fet l'estudi per cada node, però en la memòria solament es recullen els resultats considerats significatius.

En primera instància la *Figura 11.1* mostra per al node 1667 l'evolució de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió tant en la configuració original sense aire com amb aire moderat i elevat acumulat al node 1995. La *Figura 11.2* estudia el mateix node, però en aquest cas l'aire s'ha acumulat en el node 1878.

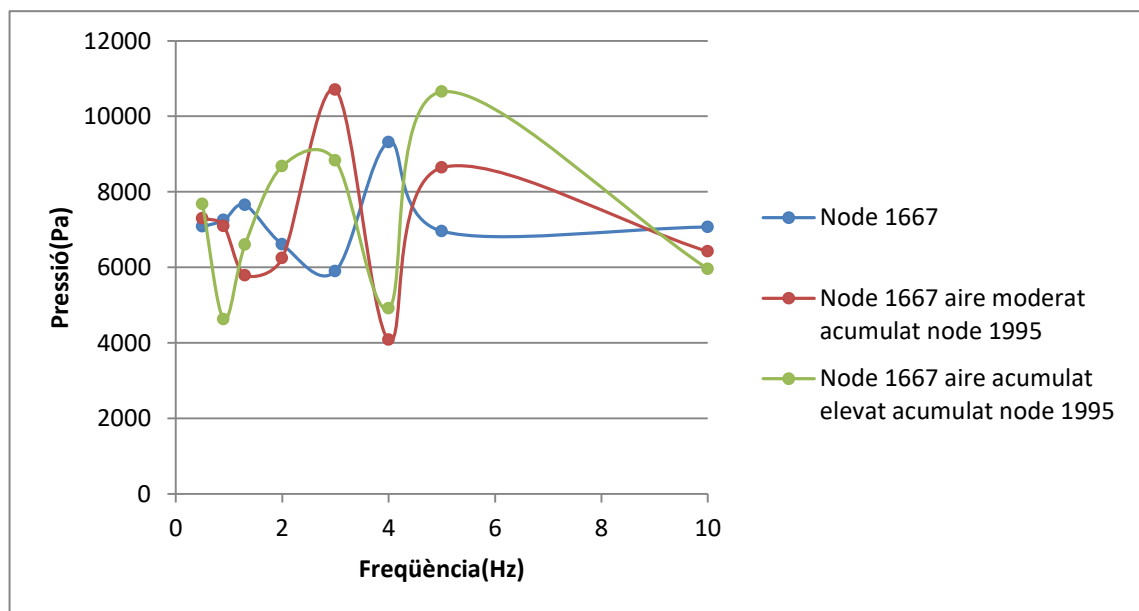


Figura 11.1 Representació gràfica de l'evolució de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió per al node 1667 amb l'aire acumulat al node 1995.

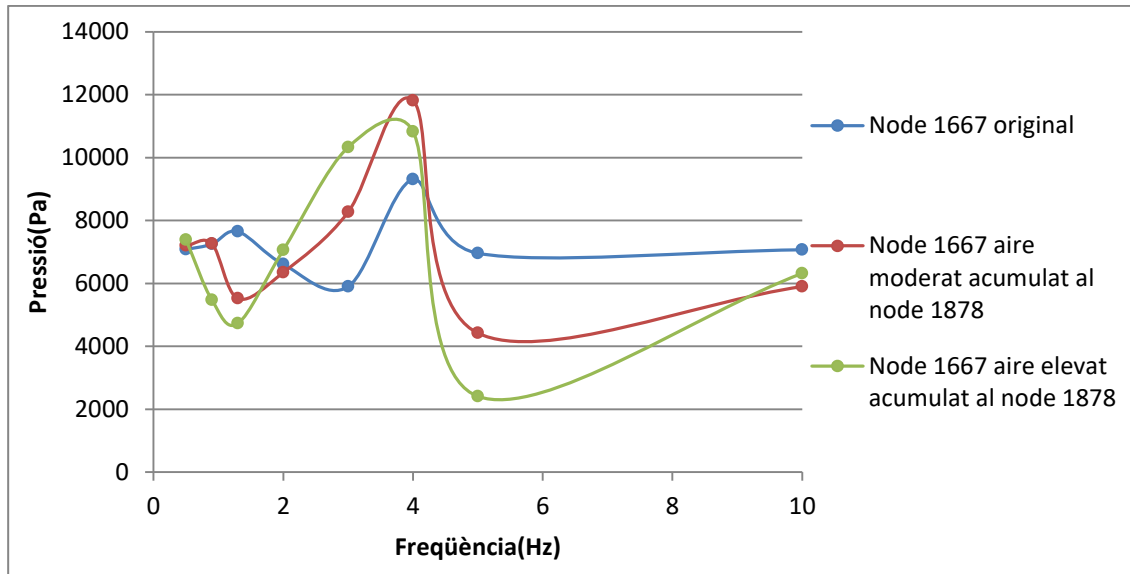


Figura 11.2 Representació gràfica de l'evolució de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió per al node 1667 amb l'aire acumulat al node 1878.

Es diferencien clarament dos comportaments. Per una banda, en la *Figura 11.1* l'efecte de l'aire fa desaparèixer el màxim de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió a 4 Hz, i sorgeixen dos nous màxims a 3 Hz i 5 Hz. Per altra banda, en la *Figura 11.2*, el màxim situat a 4 Hz incrementa el seu valor sota la presència d'aire i 5 Hz presenta un mínim. S'observa també per les dues freqüències que l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió per 1,3 Hz disminueix.

Es passa ara a estudiar el node 1748. En primera instància la *Figura 11.3* mostra per al node 1748 l'evolució de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió tant en la configuració original sense aire com amb aire moderat i elevat acumulat al node 1995. La *Figura 11.4* estudia el mateix node, però en aquest cas l'aire s'ha acumulat en el node 1878.

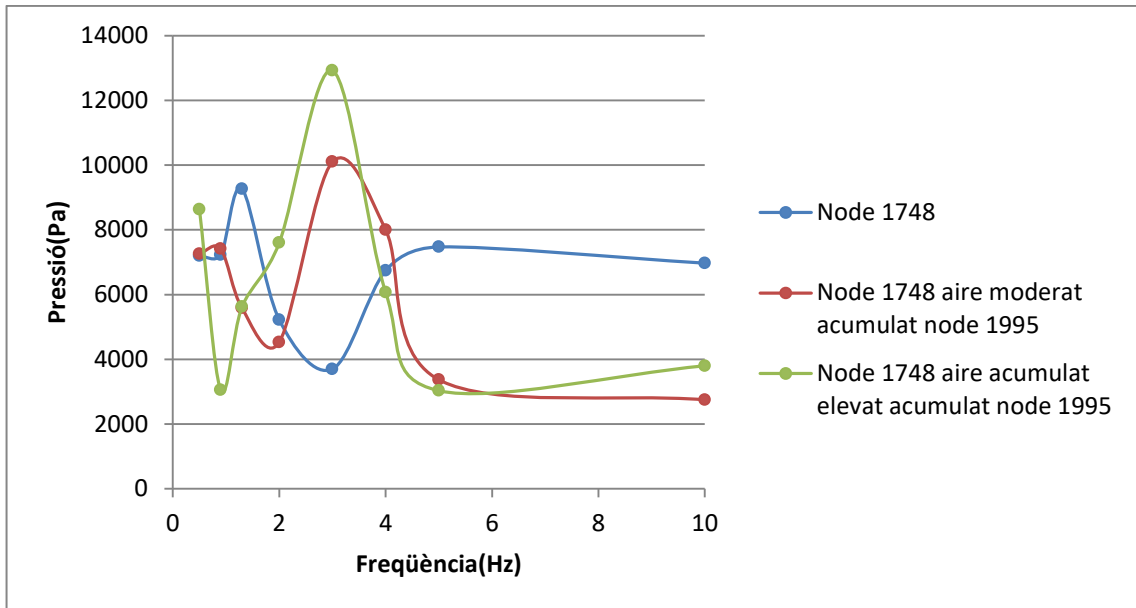


Figura 11.3 Representació gràfica de l'evolució de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió per al node 1748 amb l'aire acumulat al node 1995.

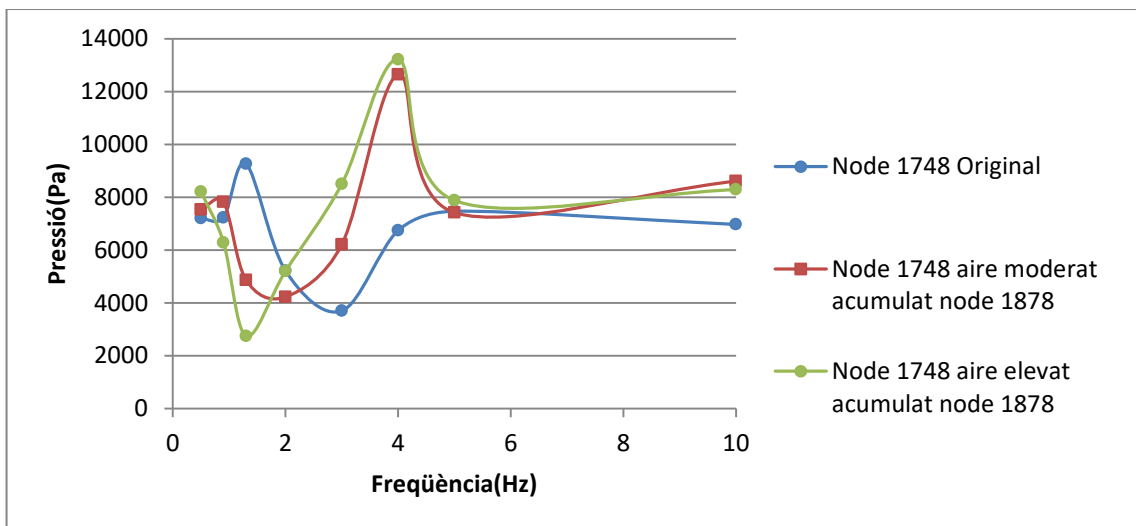


Figura 11.4 Representació gràfica de l'evolució de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió per al node 1748 amb l'aire acumulat al node 1878.

En la Figura 11.3 s'observa que el màxim que havia aparegut en el node 1667 per 5 Hz ara desapareix convertint-se en un mínim, per altra banda la presència d'aire amplifica el màxim que ja es tenia al node 1667 per 3 Hz. En la Figura 11.4 s'observa que el màxim que es tenia per 4 Hz s'amplifica. Pels dos casos es té que el màxim que sorgia a 1,3 Hz sense presència d'aire s'anul·la.

Es passa ara a estudiar el node 1907. En primera instància la Figura 11.5 mostra per al

node 1907 l'evolució de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió tant en la configuració original sense aire com amb aire moderat i elevat acumulat al node 1995. La *Figura 11.6* estudia el mateix node, però en aquest cas l'aire s'ha acumulat en el node 1878.

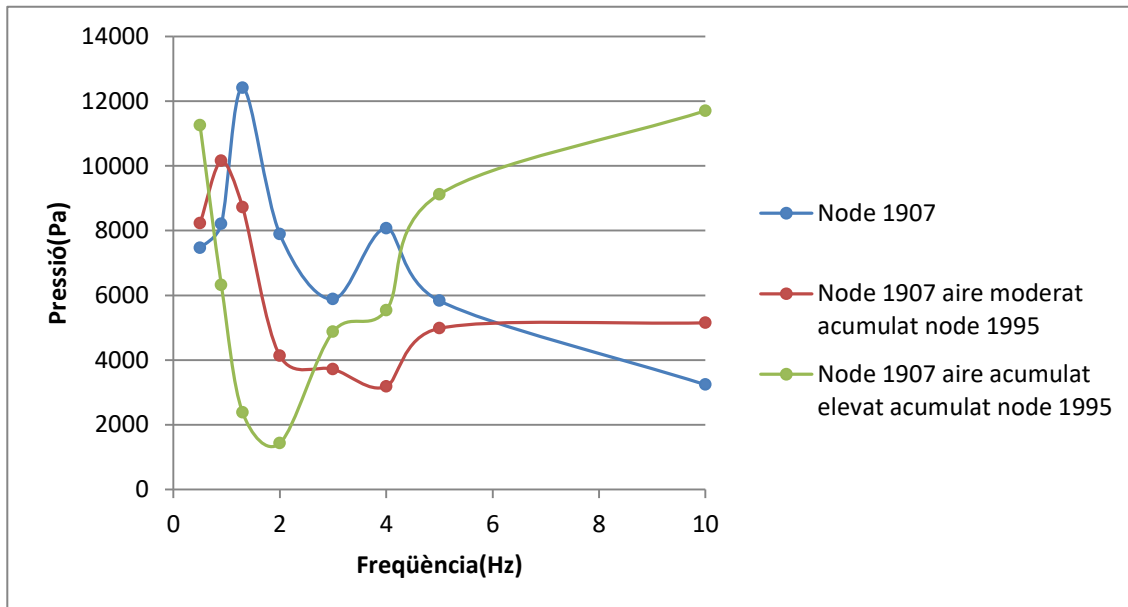


Figura 11.5 Representació gràfica de l'evolució de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió per al node 1907 amb l'aire acumulat al node 1995.

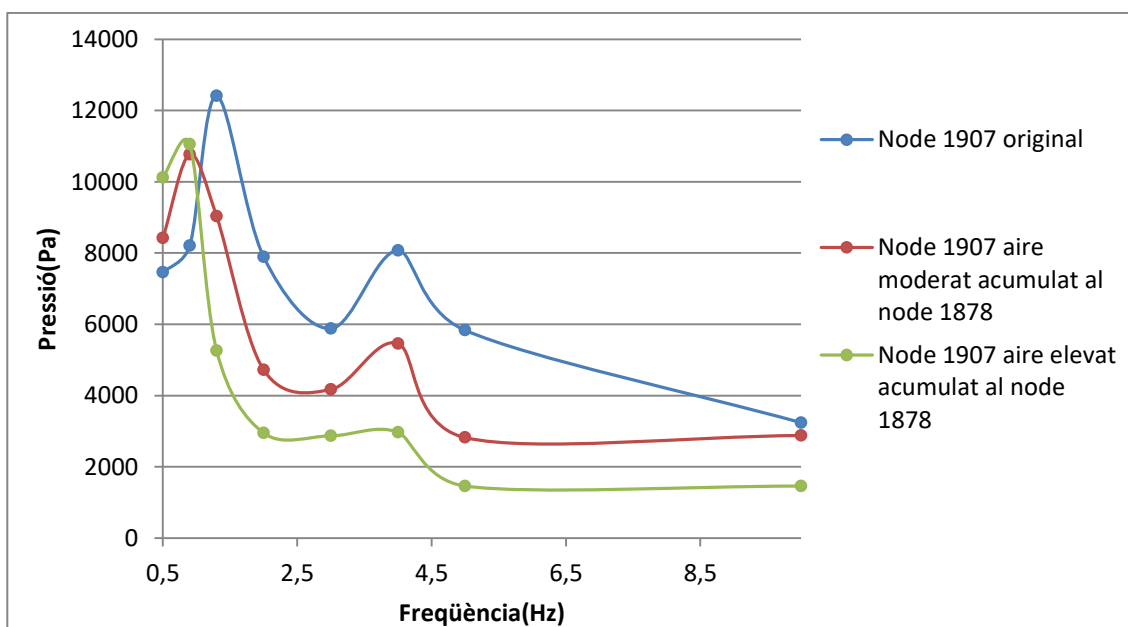


Figura 11.6 Representació gràfica de l'evolució de l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió per al node 1907 amb l'aire acumulat al node 1878.

En la *Figura 11.5* a partir de 0,9 Hz i fins a 5 Hz la presència d'aire fa disminuir l'amplitud de

les oscil·lacions de la pressió respecte al senyal original sense presència d'aire tot i que presenta una evolució bastant irregular. En la *Figura 11.6* es té que a partir de 0,9 Hz el senyal amb presència d'aire pren la mateixa forma que el senyal sense presència d'aire, però amb una amplitud menor. En la *Figura 11.6* es fa patent que com major és la presència d'aire menor és l'amplitud del senyal. Pels dos casos es té de nou que el màxim que es tenia per 1,3 Hz s'anul·la.

Abans d'extreure les conclusions de l'apartat, recordar de forma qualitativa la posició dels nodes estudiats, que es mostrava anteriorment a la *Figura 9.1*. El node 1667 es troba a una posició inicial-mitjana de l'anell superior, el node 1748 es troba a una posició mitjana de l'anell superior i el node 1907 es troba en una posició final de l'anell superior.

Un cop vistos els gràfics es poden extreure les següents conclusions.

Si l'aire s'acumula en una posició mitjana-final de l'anell superior (node 1878):

- Al node 1667 l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió és màxima per 4 Hz.
- Al node 1748 l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió és màxima per 4 Hz.
- Al node 1907 a partir de 0,9 Hz l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió seguirà la mateixa evolució que pel cas sense presència d'aire però amb una amplitud menor.

En canvi si l'aire s'acumula en una posició final de l'anell superior (node 1995):

- Al node 1667 l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió és màxima per 3 Hz i 5 Hz.
- Al node 1748 l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió és màxima per 3 Hz, per 5Hz presenta un mínim.
- Al node 1907 l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió és semblant al cas on l'aire s'acumulava al node 1995 però més irregular.

12. Planificació

12.1. Diagrama circular

Tenint en compte les necessitats del projecte i els diferents objectius que es volien assolir, s'ha dissenyat una planificació per portar a terme cadascuna de les etapes de forma òptima i poder presentar el projecte en el temps estipulat. La *Figura 12.1* mostra mitjançant un diagrama circular el volum de temps respecte el tant per cent de temps total projecte que cadascuna de les activitats representa.

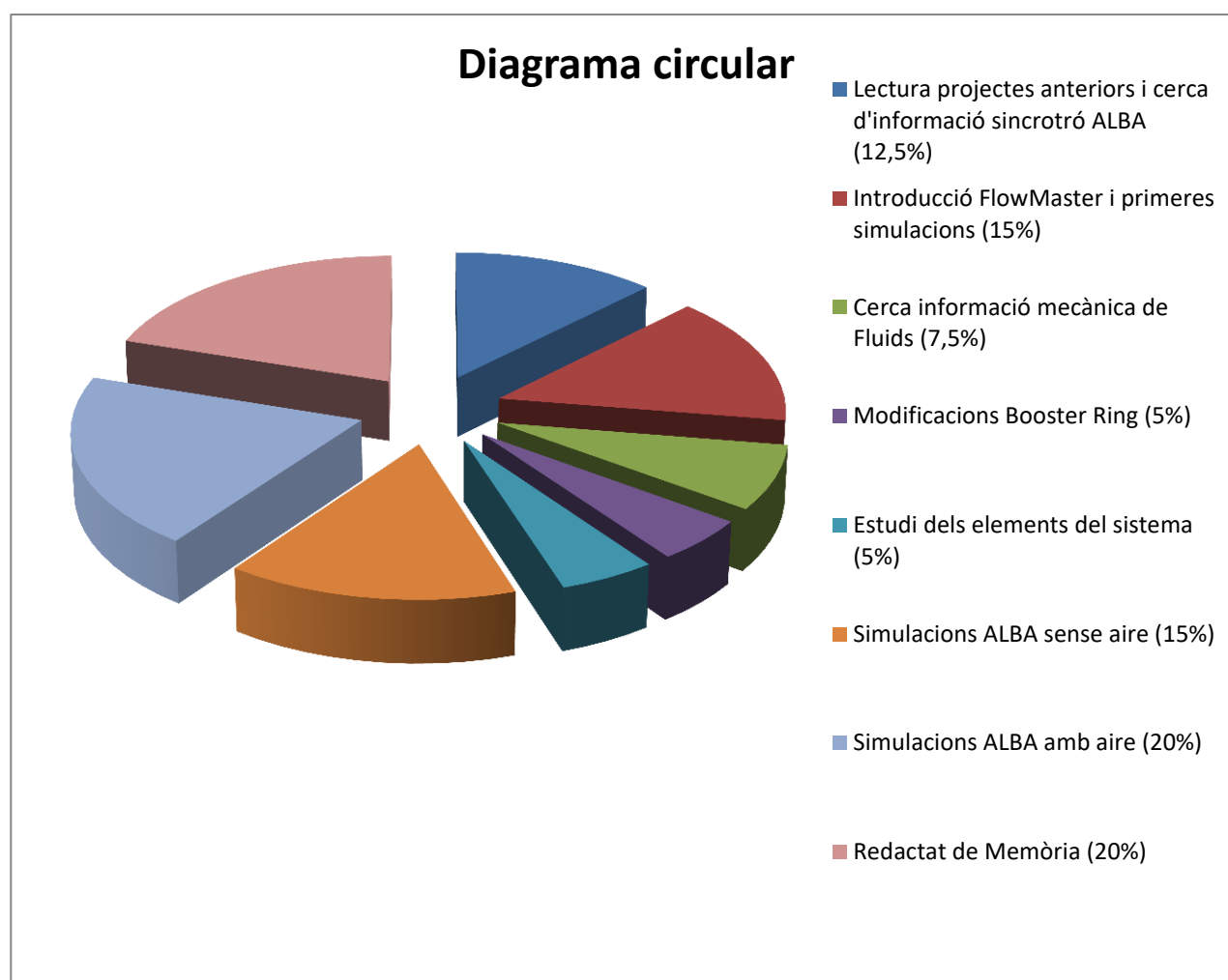


Figura 12.1 Diagrama circular.

12.2. Diagrama de Gantt

A continuació, la *Figura 12.2*, presenta un diagrama de Gantt amb la distribució de les diferents tasques i com s'han planificat al llarg del temps de duració del projecte. Notar que les tasques a les quals més temps s'ha dedicat han estat les simulacions i la part de redacció de memòria. A la part de redacció de la memòria també s'inclou el temps dedicat a tractar les dades obtingudes a partir de les simulacions per realitzar els diferents gràfics.

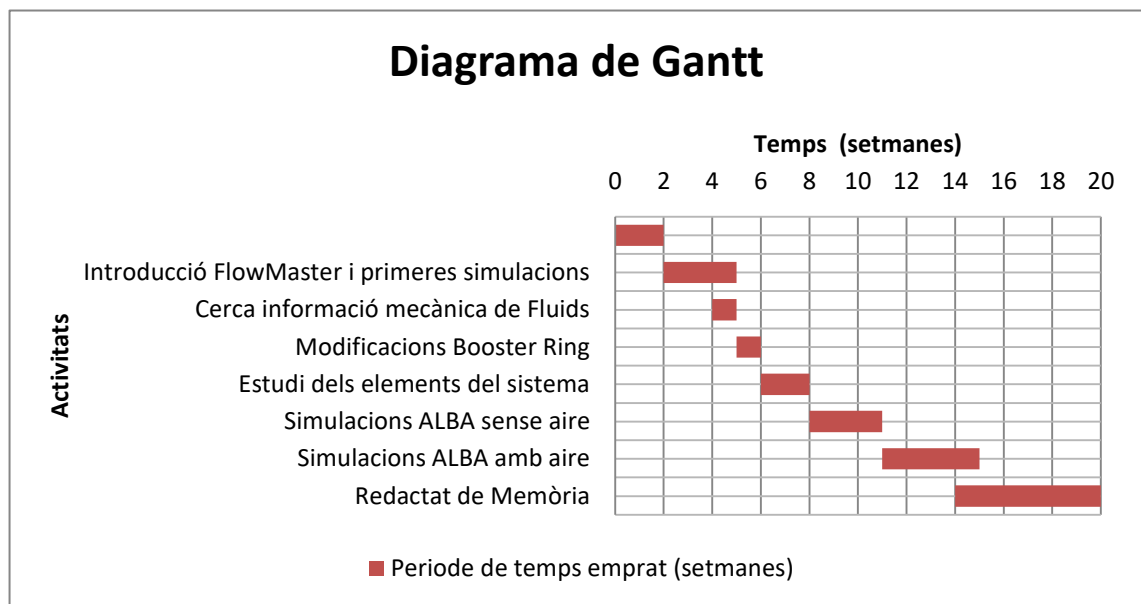


Figura 12.2 Diagrama de Gantt.

13. Impacte ambiental

Si solament es té en compte l'abast del projecte fins ara, és a dir sense implementar la vàlvula i realitzar els diferents experiments al sistema de refrigeració del sincrotró ALBA, i solament es compta el treball realitzat per les simulacions es pot considerar que el projecte té un impacte ambiental menyspreable. Com es tracta d'un projecte efectuat amb un software, es podria considerar l'efecte de components bàsics com per exemple l'energia necessària per mantenir en funcionament l'ordinador, i poder treballar en una oficina.

Si per altra banda es considera la potencial aplicació del projecte en les instal·lacions del sincrotró ALBA, l'efecte ambiental canvia. Els nous punts a considerar serien:

- Per una banda el sistema permet detectar bosses d'aire i prevenir els efectes nocius que aquestes comporten i així evitar parades innecessàries del sistema, pel que s'estalvia energia.
- En segon lloc una parada del sistema també comporta el buidatge de l'aigua ionitzada del sistema i sovint un cop finalitzada l'operació de manteniment és necessari emplenar el sistema amb aigua ionitzada pura. Novament el coneixement derivat de les simulacions realitzades implicaria un estalvi d'energia amb el buidatge i emplenament, un consum elèctric excessiu i el cost derivat de l'abocament de l'aigua.
- En tercer lloc el cost de maquinària, i elements del sistema que podrien quedar desgastats per la presència d'aire, tant cost econòmic com el cost ambiental derivat del reciclatge i adquisició de nous materials serien reduïts.
- El fet de realitzar simulacions numèriques en lloc d'experiments també suposa un estalvi de temps, diners i energia que serien necessaris per efectuar els experiments equivalents.

14. Pressupost

El pressupost s'ha determinat basant-se en l'estructura del pressupost d'Execució del Material (PEM). En primera instància s'han avaluat tant els costos relacionats amb els treballadors com els pertanyents als materials, com il·lustra la *Taula 14.1*.

Cost dels treballadors					
Recursos necessaris		Hores(h)	Cost per hora(€/h)		Costos(€)
1 Enginyer junior		300	15		4500
Costos S.S enginyer junior(7%)					315
1 Enginyer sènior		30	30		900
Costos S.S enginyer sènior(33%)					297
TOTAL					6012 €
Cost del material de treball					
Material necessari	Cost inicial (€)	Període d'amortització (anys)	Amortització anual (€/any)	Temps (anys)	Amortització acumulada (€)
1 ordinador portàtil	920	4	230	0,5	115
Llicència Flowmaster	1000	1	1000	0,5	500
Llicència Microsoft Office	100	5	20	0,5	10
Costos associats al lloguer d'espai	300				300
TOTAL					925 €

Taula 14.1 Pressupost dels costos del projecte.

D'acord amb la normativa vigent, Ordre FOM/1824/2013 de 30 de Setembre del 2013 [14], es determina el pressupost d'Execució per contracte (PEC) indicat en la *Taula 14.2*

L'article 131 del Reglament General de la Llei de contractes de les administracions públiques[10], aprovat per Real Decret 1098/2001, de 12 d'octubre, estableix que el pressupost base de licitació dels contractes s'obtindrà incrementant el d'execució del material en els conceptes de costos generals d'estructura i el 6 % en concepte de benefici industrial al contractista, així com l'impost sobre el valor afegit, que s'aplicarà sobre la suma del pressupost d'execució material i els costos generals de l'estructura.

Respecte als costos generals, senyala que cada departament ministerial fixarà, a la vista de les circumstàncies concurrents, un percentatge del 13 al 17 % en concepte de costos generals de l'empresa, costos financers, càrregues fiscals, impost sobre el valor afegit exclòs, taxes de l'Administració legalment establertes, que incideixen sobre el cost de les obres i altres derivats de les obligacions de contracte. S'exclouran els impostos que gravin renda de les persones físiques o jurídiques.

PRESSUPOST TOTAL DEL PROJECTE	
Costos	Cost €
Cost dels treballadors	6012
Cost del material	925
TOTAL	6937
Costos generals (15%)	1040,55
Benefici industrial (6%)	416,22
PEM a falta de IVA	8393,77
IVA (21%)	1762,69
PEC	10161,41 €

Taula 14.2 Pressupost final del projecte.

Conclusions

El software emprat (Flowmaster) compleix amb totes les especificacions necessàries per portar a terme les simulacions del projecte i ha permès validar les hipòtesis del treball.

Per controlar l'apertura de la vàlvula i excitar oscil·lacions de pressió significatives al llarg de l'anell Booster, sense que es generin a priori grans vòrtexs, es pot emprar un senyal del tipus $Y = 0,7 + 0,05 * \sin(2 \times \pi \times f \times t)$, on f és la freqüència del moviment.

Sense presència d'aire, s'han observat diferents respostes segons la posició de l'anell i la freqüència d'excitació. Concretament per l'anell superior s'ha observat el següent comportament:

- Per a baixes freqüències, l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió es manté constant al llarg de l'anell.
- A mesura que augmenta la freqüència va augmentant l'amplitud de les oscil·lacions, arribant al seu valor màxim per la freqüència d'1,3 Hz.
- A partir d'1,3 Hz l'amplitud de les oscil·lacions torna a descendir, arribant al seu valor mínim a 2,5 Hz.
- A partir de 2,5 Hz l'amplitud de les oscil·lacions torna a augmentar, presentant de nou un màxim a 4 Hz.
- El màxim situat a 4 Hz és menor que el d'1,3 Hz i no afecta totes les posicions de l'anell superior, sinó principalment les posicions de l'inici i final de l'anell.
- Per freqüències altes s'observa que l'amplitud presenta un comportament oscil·latori al llarg de l'anell.

Concretament per l'anell inferior s'ha observat que:

- Les oscil·lacions al final de l'anell estan molt atenuades doncs es nota l'efecte de la font de pressió constant.

- Per freqüències baixes l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió presenta un comportament lineal descendent al llarg de l'anell. Per freqüències a partir de 2 Hz es presenta un comportament de caràcter oscil·latori.
- Els màxims se situen novament a 1,3 Hz i 4 Hz, essent de nou a 1,3 Hz on es troba l'amplitud màxima.

S'han afegit acumuladors d'aire als nodes 1878 (node situat en una posició mitjana-final de l'anell superior) i al node 1995 (node situat en una posició final de l'anell superior), fent-ne variar la quantitat d'aire acumulada, i s'han observat diferents patrons de resposta:

- Les freqüències on l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió és màxima es distorsionen i presenten ara nous màxims.
- Les màximes fluctuacions a 1,3 Hz sense aire s'han desplaçat cap a freqüències més baixes. Com més elevada és la concentració d'aire més baixa és la freqüència a la qual es desplaça aquesta amplitud màxima. Aquest efecte és indiferent de la posició de l'anell on hi ha aire.
- Segons la posició de l'aire a l'anell superior, les freqüències de màxima fluctuació de pressió són diferents per un mateix punt de mesura.
 - Si hi ha aire en una posició mitjana-final de l'anell superior destaca 4Hz.
 - Si hi ha aire en una posició final de l'anell superior destaca 3 Hz.

Es pot concloure que fent oscil·lar la vàlvula a freqüències fins a 1,3 Hz i mesurant l'amplitud de les oscil·lacions de la pressió en algun punt de l'anell ja es pot determinar si hi ha presència d'aire a partir dels canvis en les amplituds màximes. En canvi, per localitzar en quina zona hi ha aire, cal fer un escombrat de freqüències fins a 10 Hz i comparar els resultats per diverses posicions amb els patrons obtinguts sense aire i amb aire en les diferents posicions estudiades.

Agraïments

M'agradaria donar les gràcies especialment al tutor del projecte, Xavier Escaler, per la seva ajuda contínua al llarg del projecte. Deixar constància de la seva total disponibilitat per aclarir qualsevol dubte, la seva guia al llarg d'aquest projecte ha estat fonamental i ha ajudat en gran mesura a l'elaboració d'aquest.

Bibliografia

- [1] GENERALITAT DE CATALUNYA. GOVERN. *Sincrotró ALBA*. [<http://www.gencat.cat/web/multimedia/cat/sincrotró/index.htm.htm>, 3 d'octubre de 2016].
- [2] DAVID, C. ALBA *Synchrotron Light Source, Infrastructure and General Services [en línia]*. Asset and Maintenance Management Workshop, 2013. AMMW, Geneva, 2013. [<http://indico.cern.ch/event/233494/session/1/contribution/56/material/slides/7.pdf>, 20 de setembre de 2016].
- [3] CELLS. HEALTH AND SAFETY. *Health and safety at ALBA (CELLS)*. Cerdanyola del Vallès, Salut i seguretat laboral.
- [4] BOLUFER, P. ALBA. *Anales de mecánica y electricidad*. Vol.87(4), 2010, p. 60-63.
- [5] ALBA synchrotron. Beamlines. [<https://www.cells.es/en/beamlines>, 15 de desembre de 2016].
- [6] ALBA synchrotron. Accelerators [<https://www.cells.es/en/accelerators>, 10 de desembre de 2016].
- [7] CAMPMANY, J. *El sincrotró de Barcelona*. Revista de física. Vol.12, p.14-21.
- [8] MADRIDEJOS, A. *Sincrotrón a toda máquina [en línia]*. El Periódico, 4 de desembre de 2016, p. 2.
- [9] QUISPE, M. *Review of ALBA cooling system crisis*. Cerdanyola del Vallès, 15 d'octubre de 2016.
- [10] PRIETO, M. (2014). *Simulació del comportament fluidodinàmic del sistema de refrigeració del sincrotró ALBA*. Barcelona: Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona.
- [11] ÇENCEL, A.Y. CIMBALA, J.M. *Mecánica de Fluidos fundamentos y aplicaciones*, Méjico: McGraw-Hill: 2006.
- [12] STREETER, V.L. WYLE, E.B. BEDFORD, K.W. *Mecánica de Fluidos*, Bogotá: McGraw-Hill: 2000.
- [13] BALIU, A. (2016). *Simulación de la respuesta fluido-dinámica del sistema de refrigeración del sincrotrón ALBA*. Barcelona: Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona.

[14] Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado.
[https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2013-10541, 5 de gener de 2017].

Bibliografia complementària

Per aprendre a fer servir el software Flowmaster ha estat de molta ajuda la següent guia:

Flowmaster V7 – New User Training. Version 10

